



Carla Alexandra Gonçalves Correia

HIDROGEOLOGIA, HIDROQUÍMICA E ANÁLISE DE RISCO DOS SISTEMAS AQUÍFEROS NAS ENVOLVENTES DAS EXSURGÊNCIAS DE MONTOURO E DE OLHOS DA FERVENÇA (CANTANHEDE)

Tese de doutoramento em Engenharia Geológica, especialidade de Hidrogeologia e Recursos Hídricos, orientada por Prof. Doutor Nelson Edgar Viegas Rodrigues e Prof. Doutor José Manuel Martins de Azevedo e apresentada ao Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Julho de 2014



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



Departamento de Ciências da Terra
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

HIDROGEOLOGIA, HIDROQUÍMICA E ANÁLISE DE RISCO DOS SISTEMAS AQUÍFEROS NAS ENVOLVENTES DAS EXSURGÊNCIAS DE MONTOURO E DE OLHOS DA FERVENÇA (CANTANHEDE)

Carla Alexandra Gonçalves Correia

Tese de doutoramento em Engenharia Geológica
Especialidade de Hidrogeologia e Recursos Hídricos

Orientada por:
Prof. Doutor Nelson Edgar Viegas Rodrigues
Prof. Doutor José Manuel Martins de Azevedo

Julho de 2014

Trabalho financiado por:

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CIÊNCIA



Este trabalho está redigido com base nas regras do novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, em vigor em Portugal desde 13 de maio de 2009 (Aviso n.º 255/2010, DR 1.ª série, n.º 182, 17 de setembro de 2010)

“O que sabemos é uma gota e o que ignoramos é um oceano”

(Isaac Newton, 1687)

Índice geral

Índice de figuras.....	XI
Índice de tabelas.....	XIX
Resumo.....	XXV
Abstract.....	XXVII
Agradecimentos.....	XXIX
Simbologia e abreviaturas.....	XXXI
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 - Enquadramento do trabalho.....	1
1.2 - Objetivos.....	2
1.3 - Estado da arte	3
1.3.1 - Nascente de Montouro.....	4
1.3.2 - Exurgência Olhos da Ferverça	8
1.4 - Metodologia desenvolvida	9
1.5 - Estrutura da tese	11
Capítulo 2 - Enquadramento geral	13
2.1 - Localização geográfica	13
2.2 - Topografia e Geomorfologia	16
2.3 - Enquadramento climatológico.....	18
2.4 - Enquadramento hidrográfico.....	25
2.5 - Enquadramento geológico	29
2.5.1 - Geologia na microbacia hidrográfica de Montouro	30
2.5.1.1 - Cretácico	31
2.5.1.2 - Quaternário	33
2.5.2 - Geologia na bacia hidrográfica de Ferverça	33
2.5.2.1 - Jurássico	35
2.5.2.2 - Cretácico	35
2.5.2.3 - Quaternário	36
2.5.3 - Geologia de subsuperfície	37
2.6 - Enquadramento estrutural da região de Cantanhede.....	39
2.7 - Mineralogia associada à exurgência de Montouro	47
2.8 - Tipologia, uso e ocupação do solo.....	49
Capítulo 3 - Prospeção Geofísica.....	57

3.1 - Métodos eletromagnéticos	58
3.1.1 - Método no domínio frequência.....	61
3.1.2 - Método no domínio tempo.....	64
3.2 - Campanhas de geofísica em Montouro	70
3.2.1 - Condutímetro Geonics EM31 e EM34	70
3.2.2 - Campanha TEM-FAST 48.....	76
3.2.3 - Conclusões.....	80
3.3 - Campanhas de geofísica em Ferverça.....	81
3.3.1 - Campanha TEM-FAST 48.....	81
Capítulo 4 - Hidrogeologia.....	87
4.1 - Unidades hidrogeológicas.....	87
4.1.1 - Parâmetros hidráulicos.....	96
4.2 - Inventário dos pontos de água.....	99
4.3 - Piezometria.....	105
4.3.1 - Piezometria na microbacia hidrográfica de Montouro.....	106
4.3.2 - Piezometria na bacia hidrográfica de Ferverça.....	109
4.4 - Modelo hidrogeológico conceptual.....	113
4.4.1 - Modelo hidrogeológico conceptual para Montouro	114
4.4.2 - Modelo hidrogeológico conceptual para Ferverça	117
4.5 - Balanço hídrico e recarga aquífera	119
4.5.1 - Método de Penman-Grindley	120
4.5.2 - Método do balanço de massa de cloretos	126
4.5.3 - Balanço de cloretos.....	128
4.5.4 - Síntese dos resultados.....	129
Capítulo 5 - Hidroquímica	131
5.1 - Amostragem das águas e métodos analíticos.....	132
5.2 - Resultados dos parâmetros físico-químicos das águas	139
5.2.1 - Resultados das medidas em Montouro de 2007 a 2010	147
5.2.2 - Resultados das campanhas de 2011 e 2012.....	152
5.2.2.1 - Temperatura.....	152
5.2.2.2 - pH.....	155
5.2.2.3 - Condutividade elétrica específica.....	157
5.2.2.4 - Salinidade.....	159
5.2.2.5 - Oxigénio dissolvido	161
5.2.2.6 - Eh.....	164
5.2.2.7 - Turbidez	166
5.2.2.8 - Bicarbonato	168
5.2.2.9 - Cloreto.....	171

5.2.2.10 - Sulfato	174
5.2.2.11 - Nitrato.....	176
5.2.2.12 - Fosfato	178
5.2.2.13 - Cálcio	181
5.2.2.14 - Sódio	184
5.2.2.15 - Magnésio.....	186
5.2.2.16 - Potássio.....	188
5.2.2.17 - Alumínio	190
5.2.2.18 - Ferro.....	193
5.2.2.19 - Manganês.....	195
5.2.2.20 - Amónia	198
5.2.3 - Resultados da campanha de 2013	198
5.3 - Fácies hidroquímica.....	199
5.3.1 - Microbacia hidrográfica de Montouro.....	199
5.3.1.1 - Evolução hidroquímica da nascente de Montouro.....	202
5.3.2 - Bacia hidrográfica de Ferverça	203
5.4 - Processos hidrogeoquímicos	207
5.4.1 - Águas da microbacia hidrográfica de Montouro	210
5.4.1.1 - Índices de saturação	213
5.4.2 - Águas da bacia hidrográfica de Ferverça.....	214
5.4.2.1 - Índices de saturação	217
5.4.3 - Síntese dos processos hidrogeoquímicos	219
5.5 - Coeficiente de correlação de Spearman	220
5.6 - Isótopo radioativo do hidrogénio (trítio).....	223
5.6.1 - Amostragem, método analítico e discussão de resultados.....	227
Capítulo 6 - Vulnerabilidade, perigosidade e risco	231
6.1 - Métodos de avaliação da vulnerabilidade	235
6.1.1 - Método DRASTIC.....	236
6.1.2 - Método GOD	238
6.1.3 - Método AVI.....	239
6.1.4 - Método SINTACS.....	240
6.1.5 - Método IS	241
6.1.6 - Método EPIK	243
6.1.7 - Método COP.....	244
6.2 - Avaliação da vulnerabilidade nas áreas de estudo	245
6.2.1 - Vulnerabilidade na microbacia hidrográfica de Montouro.....	248
6.2.2 - Vulnerabilidade na bacia hidrográfica de Ferverça.....	255
6.2.2.1 - Resultados do método DRASTIC.....	255
6.2.2.2 - Resultados do método COP.....	262

6.2.3 - Método DRASTIC-SA.....	267
6.2.3.1 - Aplicação do método DRASTIC-SA nas áreas de estudo.....	268
6.2.4 - Metodologia de calibração	273
6.2.4.1 - Calibração dos métodos nas áreas de estudo	274
6.3 - Avaliação da perigosidade nas áreas de estudo	279
6.3.1 - Perigosidade na microbacia hidrográfica de Montouro.....	283
6.3.2 - Perigosidade na bacia hidrográfica de Fervença.....	287
6.4 - Mapeamento do risco nas áreas de estudo	291
6.4.1 - Risco na microbacia hidrográfica de Montouro.....	292
6.4.2 - Risco na bacia hidrográfica de Fervença.....	293
6.4.3 - Análise comparativa do risco entre as áreas de estudo	295
6.5 - Medidas de minimização do risco	296
Capítulo 7 - Considerações finais	297
7.1 - Trabalhos futuros.....	300
Bibliografia.....	303

Índice de figuras

Figura 1.1 - Localização da nascente de Montouro (adaptado da Carta Géochimique de Portugal, escala não definida, in (Acciaiuoli, 1952)).	6
Figura 1.2 - Localização da nascente de Montouro (adaptado da Carta das Nascentes Minerais de Portugal, escala 1/1000000, 1970 in (Correia <i>et al.</i> , 2008)).	7
Figura 1.3 - Localização e caracterização da nascente de Montouro (adaptado de Atlas do Ambiente – Carta de Nascentes Minerais, escala 1/1000000, 1992 in (Correia <i>et al.</i> , 2010a)).	7
Figura 1.4 - Fonte de Cadima (adaptado de Henriques, 1998).	8
Figura 1.5 - Pormenor do borbulhar da exsurgência de Olhos da Ferveça.	9
Figura 2.1 - Concelho de Cantanhede com a identificação das freguesias de Covões e Cadima (adaptado de IGP, 2013).	13
Figura 2.2 - Imagem do poço salgado (nascente) de Montouro.	14
Figura 2.3 - Área de estudo em Montouro, sobre fragmento da Carta Militar de Portugal nº 207 (adaptado de IGeoE, 2001a).	14
Figura 2.4 - Pormenor da exsurgência de Olhos da Ferveça (a) e das respetivas captações (b).	15
Figura 2.5 - Área de estudo enquadrante da exsurgência de Olhos da Ferveça, sobre fragmento das Cartas Militares de Portugal nº 217, 218, 228 e 229 (adaptado de IGeoE, 2001b; 2001c; 2001d; 2001e).	15
Figura 2.6 - Enquadramento regional-administrativo das áreas de estudo (adaptado de IGP, 2013).	16
Figura 2.7 - Localização das áreas de estudo na Orla Mesocenozóica Ocidental (adaptado de Ribeiro <i>et al.</i> , 1979).	17
Figura 2.8 - Classificação climática de Köppen-Geiger (Csb) na região em estudo (adaptado de IPMA, 2013).	18
Figura 2.9 - Temperatura média do ar (°C) na estação climatológica de Coimbra/Bencanta (dados disponíveis em IPMA, 2013).	19
Figura 2.10 - Média da precipitação atmosférica total (mm) na estação climatológica de Coimbra/Bencanta (dados disponíveis em IPMA, 2013).	19
Figura 2.11 - Temperatura média do ar (°C) nas estações climatológicas de Santo Varão e Coimbra/Bencanta (dados disponíveis em IPMA, 2013; SNIRH, 2014b).	20
Figura 2.12 - Média da precipitação atmosférica total (mm) nas estações de Coimbra, Tentúgal, Cantanhede, Estrada e Ferreira-a-Nova no período de jan. de 1981 a dez. de 1998 (dados disponíveis em SNIRH, 2014b).	21
Figura 2.13 - Polígonos de Thiessen na bacia hidrográfica de Ferveça.	22
Figura 2.14 - Polígono de Thiessen na microbacia hidrográfica de Montouro.	22
Figura 2.15 - Precipitação atmosférica total mensal na estação de Coimbra (dados disponíveis em IM, 2010a; 2010b; 2010c; 2011a; 2011b; 2011c; 2011d; 2011e; 2011f; 2011g; 2011h; 2011i; 2011j; 2011k; 2011l; 2012b; 2012c; 2012d; 2012e; 2012f; 2012g; 2012h; 2012i; 2012j).	23
Figura 2.16 - Precipitação atmosférica total mensal na estação de Coimbra, na BhF (a) e na MhM (b) nos anos hidrológicos 2010/11 e 2011/12.	24
Figura 2.17 - Bacia hidrográfica do rio Vouga, com a localização das bacias hidrográficas estudadas (adaptado de SNIRH, 2014a).	25
Figura 2.18 - Microbacia hidrográfica de Montouro e respetiva rede de drenagem (adaptado de IGeoE, 2001a).	26
Figura 2.19 - Zonas de vale a montante (a) e a jusante (b) da nascente de Montouro, com acumulação temporária de água.	26

Figura 2.20 - Bacia hidrográfica de Ferveça e respetiva rede de drenagem (adaptado de IGeoE, 2001b; 2001c; 2001d; 2001e).....	27
Figura 2.21 - Mapa geológico da área de estudo em Montouro (adaptado de Barbosa, 1981b).....	31
Figura 2.22 - Afloramento das unidades Grés de Oiã (a) e Argilas de Vagos (b) na MhM.	32
Figura 2.23 - Mapa geológico da área de estudo em Ferveça (adaptado de Barbosa <i>et al.</i> , 1987-88) .	34
Figura 2.24 - Distribuição espacial das sondagens mecânicas SM01 a SM10 (a) e representação dos logs dos furos (b) (adaptado de Heen, 2002).....	38
Figura 2.25 - Sondagem de furo em Palhaça (adaptado de Condesso de Melo, 2002).	39
Figura 2.26 - Mapa com enquadramento tectono-estrutural da região (adaptado de Castilho, 2008).	40
Figura 2.27 - Mapa com unidades morfoestruturais e enquadramento regional (adaptado de Dinis, 2004).	41
Figura 2.28 - Mapa estrutural da BhF (adaptado de Barbosa <i>et al.</i> , 1987-88; 1988; Heen, 2002).	43
Figura 2.29 - Alinhamentos estruturais inferidos a partir da análise de relevo sombreado, com azimute de 315º (a), 90º (b) e 45º (c). Carta final dos alinhamentos estruturais identificados nas áreas de estudo (d).	45
Figura 2.30 - Pormenor do local da nascente da água de Montouro (a) e do estrato argiloso amostrado (b).	47
Figura 2.31 - Minerais identificados na amostra total, por difração de raios-X.....	47
Figura 2.32 - Minerais identificados na fração inferior a 2 µm, por difração de raios-X.	48
Figura 2.33 - Tipos de solo na microbacia hidrográfica de Montouro (adaptado de CNA, 1978).....	49
Figura 2.34 - Tipos de solo na bacia hidrográfica de Ferveça (adaptado de CNA, 1978).....	50
Figura 2.35 - Uso e ocupação do solo na MhM, com base na classificação CLC06 (adaptado de IGP, 2009).....	52
Figura 2.36 - Uso e ocupação do solo na MhM, com base na classificação COS2007 (adaptado de IGP, 2010a).....	52
Figura 2.37 - Uso e ocupação do solo na BhF, com base na classificação CLC06 (adaptado de IGP, 2009).....	53
Figura 2.38 - Uso e ocupação do solo na BhF, com base na classificação COS2007 (adaptado de IGP, 2010a).....	54
Figura 3.1 - Componentes da onda eletromagnética (adaptado de Lowrie, 2007).....	58
Figura 3.2 - Princípio de funcionamento dos métodos eletromagnéticos (adaptado de Grant & West, 1965; Reynolds, 1997; Everett, 2013).....	59
Figura 3.3 - Amplitudes e fases dos campos primário e secundário (adaptado de Lowrie, 2007).	59
Figura 3.4 - Valores da condutividade e resistividade de algumas rochas, solos e águas (adaptado de Orellana, 1982; Figueiredo, 1990; Telford <i>et al.</i> , 1990; Lowrie, 2007; Cruz, 2008).	60
Figura 3.5 - Esquema do condutímetro EM31 (adaptado de Ferreira, 1992 in Cruz, 2008).....	62
Figura 3.6 - Configurações geométricas das bobines (adaptado de McNeill, 1980b).	62
Figura 3.7 - Correntes geradas pela bobine Tx do condutímetro EM31 (adaptado de GEONICS, 1984).	62
Figura 3.8 - Esquema do condutímetro EM34 (adaptado de GEONICS, 1990).	63
Figura 3.9 - Esquema do modo de funcionamento do condutímetro EM34 (adaptado de Ferreira, 1992).	63
Figura 3.10 - Princípios básicos de medição do método TDEM: corrente em Tx (a); força eletromotriz induzida no solo (b); campo magnético secundário medido em Rx (c). Os gráficos (b) e (c) consideram a bobine recetora no centro da bobine transmissora (adaptado de McNeill, 1990; Christiansen <i>et al.</i> , 2009)).	65

Figura 3.11 - Representação esquemática do fluxo de corrente no terreno com configuração de bobine única (adaptado de McNeill, 1994).....	66
Figura 3.12 - Representação esquemática das configurações das bobines transmissora (Tx) e recetora (Rx) para aquisição de dados TDEM (adaptado de Nabighian & Macnae, 1991; Correia <i>et al.</i> , 2010a) .	67
Figura 3.13 - Equipamento TEM-FAST 48 (Applied Electromagnetic Research - AEMR, 2007a).....	67
Figura 3.14 - Esquema da unidade principal do equipamento TEM-FAST 48 (adaptado de Applied Electromagnetic Research - AEMR, 2007a).	68
Figura 3.15 - Forma dos impulsos de corrente emitidos pelo transmissor do TEM-FAST 48 (adaptado de Applied Electromagnetic Research - AEMR, 2007a).	68
Figura 3.16 - Componentes do recetor do TEM-FAST 48 (adaptado de Applied Electromagnetic Research - AEMR, 2007a).	69
Figura 3.17 - Princípios de funcionamento do sistema multicanal DAS do TEM-FAST 48 (adaptado de Applied Electromagnetic Research - AEMR, 2007a).	69
Figura 3.18 - Procedimento de campo para recolha de dados com os condutivímetros Geonics EM31 e EM34 (Figueiredo, 2006).....	70
Figura 3.19 - Registo de dados com o condutivímetro Geonics EM31. Dipolos vertical (a) e horizontal (b).	71
Figura 3.20 - Registo de dados com o condutivímetro Geonics EM34. Dipolos vertical (a) e horizontal (b).	71
Figura 3.21 - Localização dos perfis de prospeção eletromagnética Mont EM1 a Mont EM7 (adaptado de Google Earth, 2013).	72
Figura 3.22 - Distribuição dos valores de condutividade elétrica aparente das médias aritméticas de HD e VD.....	74
Figura 3.23 - Modelos dos perfis eletromagnéticos Mont EM1 a Mont EM7, com identificação das principais estruturas.	75
Figura 3.24 - Projeção dos perfis eletromagnéticos Mont EM1 a Mont EM7. É possível observar os valores elevados de condutividade nas proximidades da nascente.	76
Figura 3.25 - Pormenor do equipamento TEM-FAST 48 (a) e execução da sondagem (b).....	76
Figura 3.26 - Localização das sondagens TEM-FAST 1 a 32 (adaptado de Google Earth, 2013).	77
Figura 3.27 - Exemplo do processamento dos dados da sondagem 10. Curva de resistividade elétrica aparente (a) e resultado da inversão 1D da curva de resistividade elétrica aparente (b).	78
Figura 3.28 - Localização das tomografias geoeletricas de superfície Mont TGS1 a Mont TGS4 (adaptado de Google Earth, 2013).	78
Figura 3.29 - Secções geoeletricas das tomografias Mont TGS1 (a), Mont TGS2 (b), Mont TGS3 (c) e Mont TGS4 (d) (adaptado de Correia <i>et al.</i> , 2010a). De salientar a baixa resistividade nas proximidades da nascente visível em Mont TGS2.	79
Figura 3.30 - Prospeção eletromagnética e alinhamentos estruturais condutivos (adaptado de Correia <i>et al.</i> , 2010a).....	80
Figura 3.31 - Distribuição espacial das sondagens elétricas e dos perfis de refração sísmica (adaptado de Heen, 2002).....	81
Figura 3.32 - Localização das sondagens TEM-FAST OFT01 a OFT24 (adaptado de Google Earth, 2013).....	82
Figura 3.33 - Execução de sondagens com o equipamento TEM-FAST 48 (a) e visualização da configuração da bobine (b).....	82
Figura 3.34 - Localização das tomografias geoeletricas de superfície TGS01 a TGS05 (adaptado de Google Earth, 2010).	83

Figura 3.35 - Secções geoelectricas das tomografias TGS01 (a), TGS02 (b), TGS03 (c), TGS04 (d) TGS05 (e) (adaptado de Correia <i>et al.</i> , 2010b). É notória a transição entre blocos de resistividades muito distintas.....	84
Figura 3.36 - Projeção das secções geoelectricas das tomografias TGS01 a TGS05, onde se visualiza a continuidade das zonas mais resistivas.	85
Figura 3.37 - Marcação das estruturas de fracturação (adaptado de Correia <i>et al.</i> , 2010b), inferidas pela interpretação das secções geoelectricas.	85
Figura 4.1 - Localização das áreas de estudo na Orla Mesocenozóica Ocidental (adaptado de SNIRH, 2014a).....	88
Figura 4.2 - Unidade hidrogeológica da Orla Ocidental com a representação dos Sistemas aquíferos e a localização da área de estudo (adaptado de SNIRH, 2014a).....	89
Figura 4.3 - Localização da MhM no Sistema aquífero Cretácico de Aveiro (adaptado de SNIRH, 2014a).	90
Figura 4.4 - Enquadramento da BhF nos Sistemas aquíferos regionais (adaptado de SNIRH, 2014a). ..	92
Figura 4.5 - Localização dos pontos de água na envolvente da nascente de Montouro (sobre imagem de Google Earth, 2012).	100
Figura 4.6 - Localização dos pontos de água inventariados na microbacia hidrográfica de Montouro... ..	101
Figura 4.7 - Localização dos pontos de água inventariados na bacia hidrográfica de Ferveça.	101
Figura 4.8 - Aquisição de dados com gps diferencial (a) e pormenor da aquisição de dados (b).....	102
Figura 4.9 - Superfícies de referência altimétricas usadas em geodesia (IGP, 2012).	103
Figura 4.10 - Erros da altitude elipsoidal nos poços da envolvência da nascente de Montouro.	104
Figura 4.11 - Erros da altitude elipsoidal nos poços da microbacia hidrográfica de Montouro.	104
Figura 4.12 - Erros da altitude elipsoidal nos poços da bacia hidrográfica de Ferveça.	105
Figura 4.13 - Erros da altitude elipsoidal para todos os poços medidos.	105
Figura 4.14 - Sonda de nível e fita métrica utilizados nas campanhas piezométricas.	106
Figura 4.15 - Evolução dos níveis piezométricos nas campanhas de inverno (a) e verão (b) entre fevereiro de 2007 e maio de 2010.....	107
Figura 4.16 - Carta piezométrica da campanha de inverno de 2011 na MhM.....	107
Figura 4.17 - Carta piezométrica da campanha de verão de 2011 na MhM.....	108
Figura 4.18 - Carta piezométrica da campanha de inverno de 2012 na MhM.....	108
Figura 4.19 - Carta piezométrica da bacia hidrográfica de Ferveça no inverno de 2011 para os Sistemas aquíferos cársico (a) e Quaternário/Cretácico (b).....	110
Figura 4.20 - Carta piezométrica da bacia hidrográfica de Ferveça no verão de 2011 para os Sistemas aquíferos cársico (a) e Quaternário/Cretácico (b).....	111
Figura 4.21 - Carta piezométrica da bacia hidrográfica de Ferveça no inverno de 2012 para os Sistemas aquíferos cársico (a) e Quaternário/Cretácico (b).....	112
Figura 4.22 - Corte estratigráfico na nascente de Montouro (adaptado de Campos, 1944; Acciaiuoli, 1953).....	115
Figura 4.23 - Modelo conceptual para a hidrogeologia das envolventes da nascente de Montouro.	116
Figura 4.24 - Modelo conceptual interpretativo da hidrogeologia dos domínios envolventes das exurgências de Olhos da Ferveça.	118
Figura 4.25 - Conceptualização do modelo de Penman-Grindley (adaptado de Condesso de Melo, 2002).	120
Figura 4.26 - Balanços hídricos sequenciais ao nível do solo (mm) para a MhM.	123
Figura 4.27 - Balanços hídricos sequenciais ao nível do solo (mm) para a BhF.....	125
Figura 5.1 - Diagrama esquemático da evolução da água subterrânea (adaptado de Hiscock, 2005)... ..	132

Figura 5.2 - Pontos de água monitorizados de 2007 a 2010 na envoltura da nascente de Montouro (M00).	133
Figura 5.3 - Processos e equipamentos usados nas medições de campo.....	133
Figura 5.4 - Pontos de água amostrados na MhM.....	134
Figura 5.5 - Pontos de água amostrados na BhF.	135
Figura 5.6 - Purga do poço de Montouro (a) e amostragem da água no local de emergência da nascente (b).	136
Figura 5.7 - Bombagem do poço de Olhos da Ferverença e amostragem da água.	136
Figura 5.8 - Determinação <i>in situ</i> da alcalinidade.	136
Figura 5.9 - Filtro e seringa usados para filtração das amostras em laboratório.....	137
Figura 5.10 - Amostras das campanhas de 2011 (a) e 2012 (b) com erros de balanço iónico admissíveis de acordo com a condutividade elétrica da água.....	141
Figura 5.11 - Erros de fecho do balanço elétrico das amostras nas campanhas de 2011 (a) e 2012 (b).	142
Figura 5.12 - Comparação entre o erro de fecho do balanço elétrico e a condutividade elétrica específica das amostras da MhM, na campanha de 2011.	143
Figura 5.13 - Comparação entre o erro de fecho do balanço elétrico e a condutividade elétrica específica das amostras da MhM, na campanha de 2012.	144
Figura 5.14 - Comparação entre o erro de fecho do balanço elétrico e a condutividade elétrica específica das amostras da BhF, na campanha de 2011.	145
Figura 5.15 - Comparação entre o erro de fecho do balanço elétrico e a condutividade elétrica específica das amostras da BhF, na campanha de 2012.	146
Figura 5.16 - Valores de pH dos poços na envoltura de M00 nas campanhas de inverno (a) e verão (b) entre fevereiro de 2007 e maio de 2010.	149
Figura 5.17 - Valores de SEC dos poços na envoltura de M00 nas campanhas de inverno (a) e verão (b) entre fevereiro de 2007 e maio de 2010.	150
Figura 5.18 - Valores de salinidade dos poços na envoltura de M00 nas campanhas de inverno (a) e verão (b) entre fevereiro de 2007 e maio de 2010.	151
Figura 5.19 - Valores de pH, salinidade e SEC dos poços na MhM em julho de 2010.	151
Figura 5.20 - Valores de pH, salinidade e SEC da nascente de Montouro entre fevereiro de 2007 e julho de 2010. É possível observar a relação direta entre salinidade e SEC.	152
Figura 5.21 - Distribuição espacial da temperatura da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).	153
Figura 5.22 - Distribuição espacial da temperatura da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).	154
Figura 5.23 - Distribuição espacial do pH da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).	155
Figura 5.24 - Distribuição espacial do pH da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).	156
Figura 5.25 - Distribuição espacial de SEC da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).	158
Figura 5.26 - Distribuição espacial de SEC da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).	159
Figura 5.27 - Distribuição espacial da salinidade da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).	160
Figura 5.28 - Distribuição espacial da salinidade da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).	161
Figura 5.29 - Distribuição espacial do OD da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).	162
Figura 5.30 - Distribuição espacial do OD da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).	163
Figura 5.31 - Distribuição espacial do Eh da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).	165
Figura 5.32 - Distribuição espacial do Eh da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).	166
Figura 5.33 - Distribuição espacial da turbidez da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).	167
Figura 5.34 - Distribuição espacial da turbidez da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).	168
Figura 5.35 - Distribuição espacial do HCO ₃ da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).	169

Figura 5.36 - Distribuição espacial do HCO ₃ da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).....	170
Figura 5.37 - Distribuição espacial do Cl da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).	172
Figura 5.38 - Distribuição espacial do Cl da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).....	173
Figura 5.39 - Distribuição espacial do SO ₄ da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).	174
Figura 5.40 - Distribuição espacial do SO ₄ da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).....	175
Figura 5.41 - Distribuição espacial do NO ₃ da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).	177
Figura 5.42 - Distribuição espacial do NO ₃ da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).	178
Figura 5.43 - Distribuição espacial do PO ₄ da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).	179
Figura 5.44 - Distribuição espacial do PO ₄ da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).....	180
Figura 5.45 - Distribuição espacial do Ca da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).	182
Figura 5.46 - Distribuição espacial do Ca da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).	183
Figura 5.47 - Distribuição espacial do Na da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).	184
Figura 5.48 - Distribuição espacial do Na da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).	185
Figura 5.49 - Distribuição espacial do Mg da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).....	186
Figura 5.50 - Distribuição espacial do Mg da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).	187
Figura 5.51 - Distribuição espacial do K da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).	189
Figura 5.52 - Distribuição espacial do K da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).....	190
Figura 5.53 - Distribuição espacial do Al da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).....	191
Figura 5.54 - Distribuição espacial do Al da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).....	192
Figura 5.55 - Distribuição espacial do Fe da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).	194
Figura 5.56 - Distribuição espacial do Fe da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).....	195
Figura 5.57 - Distribuição espacial do Mn da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).....	196
Figura 5.58 - Distribuição espacial do Mn da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).	197
Figura 5.59 - Diagrama Piper das amostras da MhM da campanha de 2011.	200
Figura 5.60 - Diagrama Piper das amostras da MhM da campanha de 2012.	200
Figura 5.61 - Resumo da classificação das amostras da MhM em 2011 (a) e 2012 (b).	201
Figura 5.62 - Distribuição espacial da fácies hidroquímica da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b), representada sobre mapa geológico.....	201
Figura 5.63 - Diagrama Piper das amostras de M14 de 2011 a 2013.	202
Figura 5.64 - Diagrama Piper das amostras da nascente de Montouro de 1906 a 2013.	203
Figura 5.65 - Diagrama Piper das amostras da BhF da campanha de 2011.....	204
Figura 5.66 - Diagrama Piper das amostras da BhF da campanha de 2012.....	204
Figura 5.67 - Resumo da classificação das amostras da BhF em 2011 (a) e 2012 (b).....	205
Figura 5.68 - Diagrama Piper das amostras de F16 de 2011 a 2013.....	205
Figura 5.69 - Diagrama Piper da amostra da exsurgência de Olhos da Ferverça.....	206
Figura 5.70 - Distribuição espacial da fácies hidroquímica da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b), representada sobre mapa geológico.....	207
Figura 5.71 - Projeção dos parâmetros de campo T/pH (a) HCO ₃ /pH (b) e pH/pe/Eh (c) das águas na MhM.....	210
Figura 5.72 - Projeção da razão Ca/Mg das águas da MhM.	212
Figura 5.73 - Índices de saturação de minerais carbonatados (a) e evaporíticos (b) da água da nascente de Montouro.	214
Figura 5.74 - Projeção dos parâmetros de campo T/pH (a) HCO ₃ /pH (b) e pH/pe/Eh (c) das águas da BhF.	215
Figura 5.75 - Projeção da razão Ca/Mg das águas da BhF.....	217

Figura 5.76 - Índices de saturação de minerais carbonatados e evaporíticos da água da exurgência de Olhos da Fervença.	219
Figura 5.77 - Principais processos hidrogeoquímicos responsáveis pelos tipos de água nas áreas de estudo.	220
Figura 5.78 - Esquema da origem e distribuição do trítio (adaptado de Mook, 2000).	223
Figura 5.79 - Concentração do trítio na precipitação em locais representativos do hemisfério norte e sul (dados disponíveis em IAEA/WMO, 2013).	224
Figura 5.80 - Concentração do trítio na precipitação em duas estações de Portugal (dados disponíveis em IAEA/WMO, 2013).	225
Figura 5.81 - Diagrama nitrato versus trítio (a) e sulfato versus trítio (b).	229
Figura 5.82 - Concentração do trítio versus altitude elipsoidal (a) e trítio versus condutividade elétrica específica (b).	230
Figura 6.1 - Conceitos básicos que definem a vulnerabilidade intrínseca (a) e específica (b) (adaptado de Filippini <i>et al.</i> , 2013).	232
Figura 6.2 - Esquema conceptual para avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea (Foster <i>et al.</i> , 2006).	234
Figura 6.3 - Representação esquemática dos parâmetros do método DRASTIC (adaptado de LNEC, 2002).	238
Figura 6.4 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação (Foster <i>et al.</i> , 2006).	239
Figura 6.5 - Diagrama do método COP (adaptado de Vías <i>et al.</i> , 2004; 2006).	245
Figura 6.6 - Vulnerabilidade à poluição das formações aquíferas de Portugal Continental, através da análise clássica (adaptado de Lobo-Ferreira & Oliveira, 1993 <i>in</i> Lobo-Ferreira <i>et al.</i> , 1995), com aplicação às áreas de estudo.	246
Figura 6.7 - Mapeamento da vulnerabilidade à poluição para Portugal Continental, pelo método DRASTIC (adaptado de Lobo-Ferreira & Oliveira, 1993 <i>in</i> Lobo-Ferreira, 1998), com aplicação às áreas de estudo.	247
Figura 6.8 - Esquema geral da metodologia aplicada ao estudo da vulnerabilidade nas áreas de estudo.	248
Figura 6.9 - Mapas de caracterização dos parâmetros do índice DRASTIC na MhM: parâmetro D (a), parâmetro R (b), parâmetro A (c), parâmetro S (d), parâmetro T (e), parâmetro I (f), parâmetro C (g). Mapas do índice DRASTIC (h) e do índice DRASTIC pesticidas (i) na MhM.	253
Figura 6.10 - Mapas de caracterização dos parâmetros do índice DRASTIC na BhF: parâmetro D (a), parâmetro R (b), parâmetro A (c), parâmetro S (d), parâmetro T (e), parâmetro I (f), parâmetro C (g).	259
Figura 6.11 - Mapas do índice DRASTIC (a) e do índice DRASTIC pesticidas (b) na BhF.	261
Figura 6.12 - Número de dias de precipitação no ano (adaptado de SMN, 1975).	263
Figura 6.13 - Mapas de caracterização dos fatores do índice COP ao aquífero cársico na BhF: fator C (a), fator O (b), fator P (c). Mapa de vulnerabilidade do aquífero cársico, na BhF, segundo o índice COP (d).	265
Figura 6.14 - Mapas de caracterização do parâmetro SLd (a), do parâmetro SLD (b), do parâmetro SA (c) e do índice DRASTIC-SA (d), na MhM.	271
Figura 6.15 - Mapas de caracterização do parâmetro SLd (a), do parâmetro SLD (b), do parâmetro SA (c) e do índice DRASTIC-SA (d), na BhF.	271
Figura 6.16 - Valores percentuais das áreas do índice DRASTIC-SA na MhM (a) e na BhF (b).	273
Figura 6.17 - Mapa do índice DRASTIC modificado (a1), comparativamente ao do índice DRASTIC (a2) e mapa do índice DRASTIC-SA modificado (b1) comparativamente ao do índice DRASTIC-SA (b2), na MhM.	275

Figura 6.18 - Valores percentuais das áreas do índice DRASTIC modificado (a) e do índice DRASTIC-SA modificado (b), na microbacia hidrográfica de Montouro.	276
Figura 6.19 - Comparação dos valores do coeficiente de correlação dos vários índices com a concentração de nitratos, na microbacia hidrográfica de Montouro.	276
Figura 6.20 - Mapa do índice DRASTIC modificado (a1), comparativamente ao do índice DRASTIC (a2) e mapa do índice DRASTIC-SA modificado (b1) comparativamente ao do índice DRASTIC-SA (b2), na BhF.	278
Figura 6.21 - Valores percentuais das áreas do índice DRASTIC modificado (a) e do índice DRASTIC-SA modificado (b), na bacia hidrográfica de Fervença.	279
Figura 6.22 - Comparação dos valores do coeficiente de correlação dos vários índices com a concentração de nitratos, na bacia hidrográfica de Fervença.	279
Figura 6.23 - Esquema geral da metodologia RNLUN aplicada ao estudo do índice de perigosidade (HI).	280
Figura 6.24 - Mapas de caracterização da perigosidade: PR (a), UR (b), RN (c), LU (d), N (e) e HI (f), na MhM.	286
Figura 6.25 - Mapas de caracterização da perigosidade: PR (a), UR (b), RN (c), LU (d), N (e) e HI (f), na BhF.	289
Figura 6.26 - Esquema geral da metodologia para determinação do índice de risco (RI).	291
Figura 6.27 - Mapa do índice de risco (a) e valores percentuais das áreas do RI (b), na MhM.	292
Figura 6.28 - Mapa do índice de risco (a) e valores percentuais das áreas do RI (b), na BhF.	294
Figura 6.29 - Mapas normalizados do índice de vulnerabilidade da MhM (a) e da BhF (b).	295

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Estações meteorológicas utilizadas da base de dados do SNIRH (2014b).	20
Tabela 2.2 - Médias da precipitação atmosférica total anual (mm) nas estações meteorológicas do SNIRH (2014b) e do IPMA (2013).	21
Tabela 2.3 - Precipitação anual ponderada nas áreas de estudo, no período 1981/98.	23
Tabela 2.4 - Precipitação atmosférica total anual (mm) estimada para as áreas de estudo.	24
Tabela 2.5 - Parâmetros morfométricos da microbacia hidrográfica de Montouro e da bacia hidrográfica de Ferverça, de acordo com os elementos das Cartas Militares 1/25000.	28
Tabela 2.6 - Escoamento natural anual (m ³) em massas de água na bacia hidrográfica do rio Vouga (adaptado de Coelho <i>et al.</i> , 2012).	28
Tabela 2.7 - Correlação litostratigráfica entre as unidades das Cartas geológicas 16-C Vagos e 19-A Cantanhede onde estão representadas as áreas em estudo.	30
Tabela 2.8 - Associações de minerais argilosos características das unidades cretácicas da região de Aveiro (Neto <i>et al.</i> , 1998) e correlação com as unidades cretácicas da MhM.	48
Tabela 2.9 - Áreas do tipo de solo na MhM e na BhF.	50
Tabela 2.10 - Permeabilidade do solo na MhM e na BhF, com base na classificação de Feijó <i>et al.</i> (2012).	51
Tabela 2.11 - Áreas do uso e ocupação do solo na MhM.	53
Tabela 2.12 - Áreas do uso e ocupação do solo na BhF.	55
Tabela 3.1 - Áreas de aplicação e alvos de estudo na prospeção geofísica eletromagnética (adaptado de Everett, 2013).	57
Tabela 3.2 - Parâmetros operacionais dos condutímetro Geonics EM31 e EM34 (adaptado de Ogilvy <i>et al.</i> , 1991).	64
Tabela 3.3 - Características dos perfis eletromagnéticos Mont EM1 a Mont EM7.	72
Tabela 3.4 - Seleção dos valores de condutividade elétrica aparente medidos com o Geonics EM31 e EM34 utilizados para efetuar as secções VDs e HDs (Figueiredo, 2006).	73
Tabela 3.5 - Dados estatísticos dos valores de condutividade elétrica aparente (mS/m) dos perfis eletromagnéticos Mont EM1 a Mont EM7.	73
Tabela 4.1 - Unidades aquíferas constituintes do Sistema aquífero Cretácico de Aveiro (O2).	91
Tabela 4.2 - Unidades aquíferas constituintes do Sistema aquífero Quaternário de Aveiro (O1).	93
Tabela 4.3 - Unidades aquíferas constituintes do Sistema aquífero Tentúgal (O5).	94
Tabela 4.4 - Unidades aquíferas constituintes do Sistema aquífero Viso - Queridas (O30).	95
Tabela 4.5 - Unidades aquíferas constituintes do Sistema aquífero Cársico da Bairrada (O3).	96
Tabela 4.6 - Valores de porosidade e condutividade hidráulica de alguns materiais sedimentares (Johnson & Morris, 1962; Davis, 1969; Croff <i>et al.</i> , 1985) citados em Freeze & Cherry (1979) e Domenico & Schwartz (1997).	97
Tabela 4.7 - Parâmetros hidráulicos das formações do Sistema aquífero Quaternário de Aveiro (dados disponíveis em Peixinho de Cristo, 1985; Almeida <i>et al.</i> , 2000e; Condesso de Melo <i>et al.</i> , 2002).	98
Tabela 4.8 - Parâmetros hidráulicos das formações do Sistema aquífero Cretácico de Aveiro (dados disponíveis em Almeida <i>et al.</i> , 2000d; Condesso de Melo, 2002).	98
Tabela 4.9 - Parâmetros hidráulicos das formações do Sistema aquífero Tentúgal (dados disponíveis em Almeida <i>et al.</i> , 2000f).	99
Tabela 4.10 - Parâmetros hidráulicos das formações do Sistema aquífero Viso - Queridas (dados disponíveis em Almeida <i>et al.</i> , 2000g).	99
Tabela 4.11 - Parâmetros hidráulicos das formações do Sistema aquífero Cársico da Bairrada (dados disponíveis em Almeida <i>et al.</i> , 2000c).	99

Tabela 4.12 - Dados estatísticos da profundidade (m) dos pontos de água (poços) inventariados.....	102
Tabela 4.13 - Dados estatísticos dos níveis piezométricos (m) na MhM.....	109
Tabela 4.14 - Dados estatísticos dos níveis piezométricos (m) na BhF, para os Sistemas aquíferos cársico (Cars) e Quaternário/Cretácico (Q/C).....	113
Tabela 4.15 - Determinação da evapotranspiração potencial mensal (mm) para o período 1981-2010, com base em registos de IPMA (2013).....	121
Tabela 4.16 - Determinação da evapotranspiração potencial mensal (mm) para o ano 2010/11, com base em registos de IM (2010a; 2010b; 2010c; 2011a; 2011b; 2011d; 2011e; 2011f; 2011g; 2011h; 2011i; 2011j).....	121
Tabela 4.17 - Determinação da evapotranspiração potencial mensal (mm) para o ano 2011/12, com base em registos de IM (2011c; 2011j; 2011k; 2012b; 2012c; 2012d; 2012e; 2012f; 2012g; 2012h; 2012i; 2012j).....	121
Tabela 4.18 - Balanço hídrico sequencial ao nível do solo (mm) na MhM, para Cc = 100 mm.	122
Tabela 4.19 - Balanço hídrico sequencial ao nível do solo (mm) na MhM, para Cc = 50 mm.	123
Tabela 4.20 - Balanço hídrico sequencial ao nível do solo (mm) na BhF, para Cc = 100 mm.....	124
Tabela 4.21 - Balanço hídrico sequencial ao nível do solo (mm) na BhF, para Cc = 50 mm.....	125
Tabela 4.22 - Cálculo da recarga aquífera anual através do balanço hídrico pelo método de Penman-Grindley (considera-se que a recarga é aproximadamente igual a ΔS).	126
Tabela 4.23 - Cálculo da recarga aquífera anual pelo método de balanço de massa de cloretos.....	128
Tabela 4.24 - Cálculo da recarga (%) do aquífero associado à exurgência Olhos da Ferverença pelo método de balanço de cloretos.	128
Tabela 4.25 - Cálculo da recarga (%) do aquífero associado à exurgência Olhos da Ferverença pela forma simplificada do método de balanço de cloretos.	129
Tabela 4.26 - Estimativa da recarga aquífera média anual na microbacia hidrográfica de Montouro.....	129
Tabela 4.27 - Estimativa da recarga média anual na bacia hidrográfica de Ferverença.....	130
Tabela 5.1 - Parâmetros físico-químicos analisados nas águas amostradas, unidades de medida, métodos e equipamentos usados.	138
Tabela 5.2 - Cronograma das tarefas executadas por campanha de campo.....	139
Tabela 5.3 - Média dos erros de precisão por parâmetro para as amostras da campanha de 2012.	140
Tabela 5.4 - Erros de precisão das medidas dos parâmetros físico-químicos da amostra F15.....	140
Tabela 5.5 - Erros de balanço iónico admissíveis de acordo com a condutividade elétrica da água (Custodio & Llamas, 1983).....	141
Tabela 5.6 - Dados estatísticos dos parâmetros físico-químicos da nascente de Montouro entre fevereiro de 2007 e julho de 2010.....	147
Tabela 5.7 - Dados estatísticos dos parâmetros físico-químicos dos poços amostrados na envolvente de M00 entre fevereiro de 2007 e maio de 2010.	147
Tabela 5.8 - Dados estatísticos dos parâmetros físico-químicos dos poços amostrados na microbacia hidrográfica de Montouro em julho de 2010.....	148
Tabela 5.9 - Dados estatísticos dos valores de temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$) dos pontos amostrados.....	153
Tabela 5.10 - Dados estatísticos dos valores de pH dos pontos amostrados.....	157
Tabela 5.11 - Dados estatísticos dos valores de SEC ($\mu\text{S}/\text{cm}$) dos pontos amostrados.	158
Tabela 5.12 - Dados estatísticos dos valores de salinidade (%) dos pontos amostrados.....	160
Tabela 5.13 - Dados estatísticos dos valores de oxigénio dissolvido (mg/L) dos pontos amostrados....	162
Tabela 5.14 - Dados estatísticos dos valores de Eh (mV) dos pontos amostrados.	165
Tabela 5.15 - Dados estatísticos dos valores de turbidez (NTU) dos pontos amostrados.....	167
Tabela 5.16 - Dados estatísticos dos valores de bicarbonato (mg/L) dos pontos amostrados.	171

Tabela 5.17 - Dados estatísticos dos valores de cloreto (mg/L) dos pontos amostrados.	172
Tabela 5.18 - Dados estatísticos dos valores de sulfato (mg/L) dos pontos amostrados.	176
Tabela 5.19 - Dados estatísticos dos valores de nitrato (mg/L) dos pontos amostrados.	177
Tabela 5.20 - Dados estatísticos dos valores de fosfato ($\mu\text{g/L}$) dos pontos amostrados.	181
Tabela 5.21 - Dados estatísticos dos valores de cálcio (mg/L) dos pontos amostrados.	182
Tabela 5.22 - Dados estatísticos dos valores de sódio (mg/L) dos pontos amostrados.	184
Tabela 5.23 - Dados estatísticos dos valores de magnésio (mg/L) dos pontos amostrados.	188
Tabela 5.24 - Dados estatísticos dos valores de potássio (mg/L) dos pontos amostrados.	188
Tabela 5.25 - Dados estatísticos dos valores de alumínio (mg/L) dos pontos amostrados.	191
Tabela 5.26 - Dados estatísticos dos valores de ferro (mg/L) dos pontos amostrados.	193
Tabela 5.27 - Dados estatísticos dos valores de manganês (mg/L) dos pontos amostrados.	196
Tabela 5.28 - Resultados dos parâmetros de campo dos pontos amostrados.	198
Tabela 5.29 - Resultados dos parâmetros de laboratório dos pontos amostrados.	198
Tabela 5.30 - Resultados de parâmetros físico-químicos da água da nascente de Montouro entre 1906 e 2013.	202
Tabela 5.31 - Intervalos de concentração de elementos químicos em água doce não poluída e respetivas fontes de origem (adaptado de Appelo & Postma, 2005).	209
Tabela 5.32 - Índices hidrogeoquímicos (adaptado de Schoeller, 1956; Custodio & Llamas, 1983; Meybeck, 1987; Mayo & Loucks, 1995; Katz <i>et al.</i> , 1997; Feitosa & Filho, 2000; Rajmohan & Elango, 2004; Castilho, 2008; Farid <i>et al.</i> , 2012). $r = \text{meq/L}$	209
Tabela 5.33 - Resultados dos índices hidrogeoquímicos das águas da MhM em 2011.	211
Tabela 5.34 - Resultados dos índices hidrogeoquímicos das águas da MhM em 2012.	211
Tabela 5.35 - Resultados dos índices hidrogeoquímicos da água da nascente de Montouro.	211
Tabela 5.36 - Índices de saturação das águas da MhM.	213
Tabela 5.37 - Resultados dos índices hidrogeoquímicos da água da exurgência de Olhos da Ferverça.	215
Tabela 5.38 - Resultados dos índices hidrogeoquímicos das águas da BhF em 2011.	216
Tabela 5.39 - Resultados dos índices hidrogeoquímicos das águas da BhF em 2012.	217
Tabela 5.40 - Índices de saturação das águas da BhF.	218
Tabela 5.41 - Coeficientes de correlação de Spearman entre os parâmetros físico-químicos relativos às águas da MhM.	221
Tabela 5.42 - Coeficientes de correlação de Spearman entre os parâmetros físico-químicos relativos às águas da BhF.	221
Tabela 5.43 - Parâmetros das estações de medição de trítio, em Portugal (informação disponível em IAEA/WMO, 2013).	225
Tabela 5.44 - Dados estatísticos das concentrações de trítio (TU) medidas nas estações em Portugal (informação disponível em IAEA/WMO, 2013).	225
Tabela 5.45 - Interpretação qualitativa da concentração em trítio (^3H) das águas em regiões continentais (adaptado de Clark & Fritz, 1997).	227
Tabela 5.46 - Resultados da concentração em trítio (^3H) das águas amostradas.	228
Tabela 5.47 - Estimativa da idade das águas amostradas função da concentração em trítio (^3H).	229
Tabela 6.1 - Fontes de poluição da água subterrânea (adaptado de Notenboom <i>et al.</i> , 1994).	233
Tabela 6.2 - Avaliação do risco: questões principais da avaliação da intensidade do risco, da avaliação da sensibilidade do risco e da gestão do risco (adaptado de Daly <i>et al.</i> , 2004).	234
Tabela 6.3 - Parâmetros, classes, valores e pesos do método DRASTIC (adaptado de Aller <i>et al.</i> , 1987).	237

Tabela 6.4 - Classes de vulnerabilidade do índice DRASTIC (adaptado de Aller <i>et al.</i> , 1987; Fraga <i>et al.</i> , 2013).....	238
Tabela 6.5 - Classes de vulnerabilidade do índice AVI (adaptado de Van Stempvoort <i>et al.</i> , 1992).	240
Tabela 6.6 - Sequência de pesos multiplicadores indicados para SINTACS (adaptado de Civita, 2010).	241
Tabela 6.7 - Classes de vulnerabilidade do índice SINTACS (adaptado de De Maio <i>et al.</i> , 2001).....	241
Tabela 6.8 - Parâmetros e fatores de ponderação do IS (Francés <i>et al.</i> , 2001; Ribeiro, 2005).....	241
Tabela 6.9 - Classes e valores dos parâmetros D, R, A e T (adaptado de Ribeiro, 2005; Paralta, 2009).	242
Tabela 6.10 - Classes e valores do parâmetro LU (adaptado de Ribeiro, 2005; Paralta, 2009).....	243
Tabela 6.11 - Classes de vulnerabilidade do IS (Ribeiro, 2005).....	243
Tabela 6.12 - Valores de cada parâmetro do índice EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1998).	244
Tabela 6.13 - Classes de vulnerabilidade do índice EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1998; Doerfliger <i>et al.</i> , 1999).....	244
Tabela 6.14 - Valores do parâmetro D na microbacia hidrográfica de Montouro.	249
Tabela 6.15 - Valores do parâmetro R na microbacia hidrográfica de Montouro.	249
Tabela 6.16 - Valores do parâmetro A na microbacia hidrográfica de Montouro.	249
Tabela 6.17 - Valores do parâmetro S na microbacia hidrográfica de Montouro.	250
Tabela 6.18 - Valores do parâmetro T na microbacia hidrográfica de Montouro.....	250
Tabela 6.19 - Valores do parâmetro I na microbacia hidrográfica de Montouro.....	251
Tabela 6.20 - Valores do parâmetro C na microbacia hidrográfica de Montouro.	251
Tabela 6.21 - Valores do índice DRASTIC na microbacia hidrográfica de Montouro.....	252
Tabela 6.22 - Valores do índice DRASTIC pesticidas na microbacia hidrográfica de Montouro.....	252
Tabela 6.23 - Valores do parâmetro D na bacia hidrográfica de Ferveça.	255
Tabela 6.24 - Valores do parâmetro R na bacia hidrográfica de Ferveça.	255
Tabela 6.25 - Valores do parâmetro A na bacia hidrográfica de Ferveça.	256
Tabela 6.26 - Valores do parâmetro S na bacia hidrográfica de Ferveça.	256
Tabela 6.27 - Valores do parâmetro T na bacia hidrográfica de Ferveça.....	257
Tabela 6.28 - Valores do parâmetro I na bacia hidrográfica de Ferveça.....	257
Tabela 6.29 - Valores do parâmetro C na bacia hidrográfica de Ferveça.	257
Tabela 6.30 - Valores do índice DRASTIC na bacia hidrográfica de Ferveça.....	258
Tabela 6.31 - Valores do índice DRASTIC pesticidas na bacia hidrográfica de Ferveça.....	258
Tabela 6.32 - Valores do fator C para o aquífero cársico na bacia hidrográfica de Ferveça.	262
Tabela 6.33 - Valores do fator O para o aquífero cársico na bacia hidrográfica de Ferveça.	263
Tabela 6.34 - Valores do fator P para o aquífero cársico na bacia hidrográfica de Ferveça.....	264
Tabela 6.35 - Valores do índice COP para o aquífero cársico na bacia hidrográfica de Ferveça.....	264
Tabela 6.36 - Valores dos parâmetros SLd (a), SLD (b) e SA (c).....	268
Tabela 6.37 - Valores do parâmetro SLd, na microbacia hidrográfica de Montouro.	269
Tabela 6.38 - Valores do parâmetro SLd, na bacia hidrográfica de Ferveça.	269
Tabela 6.39 - Valores do parâmetro SLD, na MhM e na BhF.....	269
Tabela 6.40 - Valores do parâmetro SA, na MhM e na BhF.	270
Tabela 6.41 - Pesos originais e modificados e coeficiente de correlação dos parâmetros DRASTIC com a concentração de nitratos, na MhM.	275
Tabela 6.42 - Pesos originais e modificados e coeficiente de correlação dos parâmetros DRASTIC-SA com a concentração de nitratos, na MhM.	275

Tabela 6.43 - Pesos originais e modificados e coeficiente de correlação dos parâmetros DRASTIC e DRASTIC-SA com a concentração de nitratos, na BhF.....	277
Tabela 6.44 - Valores da classe de perigosidade da rede viária principal (a), da rede viária não pavimentada (b) e rede viária (c).	281
Tabela 6.45 - Valores do parâmetro uso do solo e respectivas classes de perigosidade do uso do solo (LU).....	282
Tabela 6.46 - Valores da classe de perigosidade do nitrato.....	283
Tabela 6.47 - Classificação do índice de perigosidade.....	283
Tabela 6.48 - Valores da classe de perigosidade da rede viária na MhM.	284
Tabela 6.49 - Valores da classe de perigosidade do uso e ocupação do solo na MhM.....	284
Tabela 6.50 - Valores da classe de perigosidade do nitrato na MhM.....	285
Tabela 6.51 - Valores da classe do índice de perigosidade na MhM.	285
Tabela 6.52 - Valores da classe de perigosidade da rede viária na BhF.	287
Tabela 6.53 - Valores da classe de perigosidade do uso e ocupação do solo na BhF.....	288
Tabela 6.54 - Valores da classe de perigosidade do nitrato na BhF.	288
Tabela 6.55 - Valores da classe do índice de perigosidade na BhF.....	288
Tabela 6.56 - Classificação do índice de risco (RI).....	292

Resumo

As exurgências de Montouro e de Olhos da Fervença estão associadas a formações sedimentares, detríticas e carbonatadas, da Orla Mesocenozóica Ocidental. O trabalho de investigação desenvolveu-se nas zonas envoltentes das exurgências, nomeadamente na microbacia hidrográfica de Montouro e na bacia hidrográfica de Fervença.

Com o intuito de melhor conhecer a hidrogeologia e hidroquímica destas áreas realizaram-se trabalhos multidisciplinares, que possibilitaram reunir informação para quantificar a vulnerabilidade intrínseca e, posteriormente, estimar o risco.

Em ambos os locais existe a presença de uma forte cobertura sedimentar que impossibilita a observação de estruturas geológicas, tendo sido realizadas campanhas de prospeção eletromagnética, nos domínios tempo e frequência, que possibilitaram identificar alinhamentos estruturais hidraulicamente condutivos associados às exurgências.

As campanhas de campo incluíram, igualmente, a inventariação de pontos de água, a medição piezométrica e a amostragem de águas, com medição *in situ* de parâmetros físico-químicos e com realização de análises químicas e isotópicas. Esta informação permitiu a elaboração de mapas piezométricos, com identificação dos principais fluxos de água subterrânea e das principais zonas de recarga. Simultaneamente, construíram-se mapas hidroquímicos e a interpretação dos resultados possibilitou estabelecer os processos hidrogeoquímicos atuantes nas águas ao longo do seu percurso. A conjugação destes dados conduziu à criação de uma proposta de modelo hidrogeológico conceptual para os locais de estudo.

A nascente de Montouro surge em formações sedimentares porosas, no entanto, o aquífero associado estará em domínios profundos onde, para além deste tipo de formações, ocorrem rochas sedimentares carbonatadas e evaporíticas, responsáveis pela fácies hidrogeoquímica cloretada sódico-magnésico-cálcica da sua água. A exurgência de Olhos da Fervença constitui um ponto de descarga natural do Sistema Cársico da Bairrada e a água apresenta fácies bicarbonatada cálcica.

A vulnerabilidade intrínseca foi avaliada através dos métodos DRASTIC e COP. Foi estabelecido um método modificado designado DRASTIC-SA, que considera o parâmetro análise estrutural (SA). Os índices apresentam valores mais elevados de vulnerabilidade intrínseca nas zonas de afloramento das formações quaternárias e/ou das formações carsificadas, correspondendo aos locais de recarga das unidades aquíferas. O índice de perigosidade foi obtido através da metodologia RNLUN, assinalando as zonas de maior perigosidade.

Os resultados do índice de vulnerabilidade intrínseca e do índice de perigosidade viabilizaram a elaboração dos mapas de risco para as bacias hidrográficas em estudo. As zonas de risco moderado a baixo estão, geralmente, associadas à ocupação florestal, e as zonas de risco mais elevado estão relacionadas com zonas urbanas, de atividade industrial ou agrícola.

Palavras-chave: água subterrânea, prospeção eletromagnética, hidroquímica, vulnerabilidade, perigosidade, avaliação do risco, Montouro, Olhos da Fervença

Abstract

The Montouro and Olhos da Ferveça springs are associated with sedimentary formations, detrital and carbonates. The research was developed in the surrounding areas of both springs, particularly in the small watershed of Montouro and in the watershed of Ferveça.

To understand the hydrogeology and hydrochemistry of these areas and to, subsequently, quantify the intrinsic vulnerability and estimate the risk, a multidisciplinary approach was followed.

In both places there is the presence of a thick sedimentary cover which prevents the observation of geological structures. To overcome this limitation, electromagnetic prospecting campaigns were conducted, in the time and frequency domains, which allowed to identify hydraulically conductive structural alignments associated with the springs.

The field campaigns also included an inventory of water points, the piezometric measurement and sampling of water, including *in situ* measurement of physico-chemical parameters and conducting chemical and isotopic analyzes. This information allowed the development of piezometric maps, showing the main flows of groundwater and major recharge areas. Simultaneously, hydrochemical maps were elaborated and the interpretation of the results allowed to establish the active hydrogeochemical processes in the waters along its route. The combined analysis of all these data led to the creation of a conceptual hydrogeological model for the studied sites.

The Montouro spring arises in porous sedimentary formations. However, the associated aquifer is probably located at deeper domains where evaporitic and carbonated sedimentary rocks are present. This justifies the chlorinated sodium-calcium-magnesium hydrogeochemical facies of its water. The Olhos da Ferveça spring is a natural point of discharge of the Bairrada Karst System, and its water exhibits calcium bicarbonate facies.

The intrinsic vulnerability was evaluated using the DRASTIC and COP methods, and a new modified method was established and used (DRASTIC-SA), which takes into account the Structural Analysis (SA) parameter. The indices exhibit higher values of intrinsic vulnerability in areas of quaternary and/or karst formations, which correspond to the recharge sites of the aquifer units. The hazard index was obtained through the RNLUN methodology, and areas of higher hazard were marked out.

The results of the intrinsic vulnerability and dangerousness indices, made possible the preparation of risk maps for the watersheds under study. Areas of moderate to low risk are usually associated with forest occupation, and the areas exhibiting the highest risk are related to urban, industrial or agricultural activity.

Keywords: groundwater, electromagnetic prospection, hydrochemistry, vulnerability, hazard, risk assessment, Montouro, Olhos da Ferveça

Agradecimentos

A realização deste trabalho tornou-se possível com a colaboração, direta ou indireta, de pessoas e instituições, às quais exprimo o meu profundo agradecimento.

Ao Prof. Doutor Nelson Rodrigues, orientador deste trabalho, agradeço a sugestão do tema, o incentivo e a confiança na elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Doutor José Manuel Azevedo, co-orientador, agradeço a disponibilidade e ajuda no trabalho de campo, as sugestões e críticas construtivas.

Especial agradecimento ao Prof. Doutor Fernando Pedro Figueiredo pelo empenho e apoio permanente, pelo imprescindível acompanhamento nos trabalhos de campo, pela disponibilidade e sugestões pertinentes.

À Fundação para a Ciência e Tecnologia agradeço o financiamento deste trabalho através da Bolsa de doutoramento SFRH/BD/46636/2008 e respetivo Programa de Financiamento POPH/FSE.

Agradeço às unidades de acolhimento da Universidade de Coimbra, Centro de Geociências e Centro de Investigação da Terra e do Espaço (antigo Centro de Geofísica).

Um agradecimento à Biblioteca do Departamento de Ciências da Terra – FCTUC, especialmente à Sr.^a Conceição Cruz e à Dr.^a Cristina Brojo, pela ajuda na pesquisa e localização bibliográfica.

Agradeço aos laboratórios do Departamento de Ciências da Terra – FCTUC, nomeadamente o de Difração e Fluorescência de Raios X, na pessoa do Sr. Carlos Maia, o de Sedimentologia, ao seu responsável Prof. Doutor Pedro Proença e Cunha e à D. Manuela Blanco, e o Químico pelas condições para realização das análises químicas e o apoio do Prof. Doutor João Pratas e da sua equipa, Igor Morais e Joana Campos.

À Direção de Serviços de Recursos Hidrogeológicos, Geotérmicos e Petróleo (DSRHGP), Direção Geral de Energia e Geologia, ao seu Diretor Dr. José Cruz e à sua secretária D. Clarisse Moreira, agradeço as facilidades na consulta do processo da nascente de Montouro.

À Administração da Região Hidrográfica do Centro (ARH-Centro), concretamente à Dr.^a Paula Garcia, obrigada pelas facilidades na consulta de documentação relativa a Olhos da Ferverça.

À Inova-EEM, especialmente a Eng. Elsa Bastos, agradeço as facilidades concedidas no acesso a Olhos de Ferverça e a cedência de alguns dados.

Ao Instituto Geográfico do Exército (IGeoE), um agradecimento pela cedência de material cartográfico, ao abrigo do protocolo com a FCTUC.

Ao Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro e Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P. (LNEG) agradeço a cedência do equipamento Geonics EM34.

Agradecimento para todos os particulares e entidades públicas e privadas que facilitaram o acesso aos seus terrenos e às suas captações de água subterrânea.

Agradeço ao Doutor Rui Gonçalves pelos esclarecimentos sobre *software* e tratamento de dados do TEM-FAST 48.

Estou grata ao Prof. Doutor Marques da Silva, pela cedência de informação.

À Prof.^a Doutora Ana Castilho agradeço as sugestões, as conversas e esclarecimentos, que se tornaram em aprendizagens, e o interesse ao longo do trabalho.

Ao Ricardo Cruz muito obrigada pela ajuda no trabalho de campo e pela aprendizagem conjunta na utilização do equipamento TEM-FAST 48.

Um agradecimento especial à colega Ana Machadinho, pelo apoio nas campanhas de campo, pela ajuda com *software* e pela troca de ideias e sugestões ao longo do trabalho.

Aos meus amigos, gostaria de agradecer pelo permanente incentivo e compreensão.

Queria salientar e agradecer o apoio incondicional da minha família, especialmente dos meus pais pela sua paciência, compreensão e carinho.

E a ti Filipe, meu querido, meu companheiro de vida e, também, de trabalho de campo, agradeço a tua presença e o teu encorajamento em todas as etapas deste trabalho, bem como a revisão preciosa.

A todos os que injustamente esqueci de referir...MUITO OBRIGADA!

Simbologia e abreviaturas

A	Área
ADC	Conversor de analógico para digital
A_i	Área de influência de cada estação
Al	Alumínio
a_o	Atividade inicial do isótopo
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
ARH	Administração da Região Hidrográfica
a_t	Atividade residual do isótopo
AVI	Índice de vulnerabilidade do aquífero (Aquifer Vulnerability Index)
b	Espessura ou espessura saturada do aquífero
BE	Balanco elétrico
BhF	Bacia hidrográfica de Fervença
BP	Fração de cloreto de corpos externos
By	Campo magnético
c	Resistência hidráulica
C	Correlação entre cada parâmetro do método de avaliação da vulnerabilidade e a concentração de nitratos
Ca	Cálcio
$CaCO_3$	Carbonato de cálcio
C_{AS}	Concentração média de cloretos na água subterrânea
Cc	Capacidade de campo
C_{DS}	Concentração média de cloreto na deposição seca
CH_4	Metano
Cl	Cloreto
CLC	CORINE Land Cover
CMMV	Câmara Municipal de Montemor-o-Velho
CNA	Comissão Nacional do Ambiente
CO_2	Dióxido de carbono
COS	Carta de Ocupação do Solo
COP	Método de avaliação da vulnerabilidade, que inclui os parâmetros C – concentração do fluxo, O – camadas sobrejacentes e P – precipitação
C_P	Concentração média de cloreto na água chuva
C_R	Concentração média de cloreto na escorrência superficial
C_S	Concentração média de cloreto na água de recarga
CV	Coefficiente de variação de Pearson
CVRM	Centro de Geo-Sistemas
d	Espessura
d	Número de dias do mês

DAS	Sistema multicanal de integração e armazenamento da informação analógica
<i>Dd</i>	Densidade de drenagem
DGPS	Sistema de posicionamento global diferencial (Differential Global Positioning System)
dh	Distância ao ponto de infiltração
DH	Défice hídrico
dh/dl	Gradiente hidráulico
DOP	Diluição de precisão (Dilution of Precision)
DRAOT	Direção Regional do Ambiente e Ordenamento do Território
DRASTIC	Método de avaliação da vulnerabilidade, que inclui os parâmetros D – profundidade do nível freático, R – recarga do aquífero, A – material do aquífero, S – tipo de solo, T – topografia, I – impacto da zona não saturada e C – condutividade hidráulica do aquífero
DRASTIC-SA	Método de avaliação da vulnerabilidade, que inclui os parâmetros D – profundidade do nível freático, R – recarga do aquífero, A – material do aquífero, S – tipo de solo, T – topografia, I – impacto da zona não saturada, C – condutividade hidráulica do aquífero e SA – análise estrutural
ds	Distância ao fluxo subterrâneo
Eh	Potencial redox relativo a meia reação do par H_2/H^+
E_{meas}	Potencial redox medido no campo
EPA	Environmental Protection Agency
EPIK	Método de avaliação da vulnerabilidade, que inclui os parâmetros E – intensidade da carsificação e permeabilidade, P – material de cobertura do aquífero, I – condições de infiltração e K – extensão da rede cársica
E_{ref}	Potencial redox de referência
ERSHA	Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo
ETP	Evapotranspiração potencial
ETR	Evapotranspiração real
Ex	Campo elétrico
<i>f</i>	Frequência do campo eletromagnético
FAO	Food and Agriculture Organization
FDEM	Métodos no domínio frequência (Frequency Domain Methods)
Fe	Ferro
F_p	Fator protetor
GFAAS	Espectrofotometria de absorção atômica com grafite
GNIP	Global Network of Isotopes in Precipitation
GNSS	Global Navigation Satellite System
GOD	Método de avaliação da vulnerabilidade, que inclui os parâmetros G – ocorrência de água subterrânea, O – litologia das camadas superiores e D – profundidade do nível freático
GPS	Sistema de posicionamento global (Global Positioning System)

Gv	Vulnerabilidade global
h	Altitude ou cota elipsoidal
H	Altitude ortométrica
^3H	Isótopo de trítio
H_2CO_3	Ácido carbónico
H_2S	Sulfureto de hidrogénio
HCO_3	Bicarbonato
HD	Dipolo horizontal
HI	Índice de perigosidade
HVP	Dispositivo de proteção contra voltagens elevadas
i	Índice de calor mensal
I	Índice de calor anual
IAEA	International Atomic Energy Agency
IAH	International Association of Hydrogeologists
IAP	Produto da atividade iónica
<i>Id</i>	Índice de declividade
ID	Índice DRASTIC
IDAD	Instituto do Ambiente e Desenvolvimento
ID-SA	Índice DRASTIC-SA
IDW	Inverso da distância (Inverse Distance Weighted)
IGeoE	Instituto Geográfico do Exército
IGM	Instituto Geológico e Mineiro
IGP	Instituto Geográfico Português
IM	Instituto de Meteorologia
INETI	Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
IS	Índice de saturação (cap.5)
IS	Índice de suscetibilidade (cap.6); método de avaliação da vulnerabilidade, que inclui os parâmetros D – profundidade do nível freático, R – recarga do aquífero, A – material do aquífero, T – topografia e LU – ocupação do solo
ISRIC	International Soil Reference and Information Centre
ITN	Instituto Tecnológico e Nuclear
<i>K</i>	Condutividade hidráulica
K	Potássio
<i>Ka</i>	Coeficiente de alongamento
<i>Kc</i>	Coeficiente de compacidade
<i>Kf</i>	Fator forma
KT	Constante de solubilidade
<i>L</i>	Comprimento da linha de água principal
<i>Le</i>	Comprimento do retângulo equivalente

${}^6\text{Li}$	Isótopo de lítio
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
Lt	Comprimento total das linhas de água
MAX	Valor máximo
Mg	Magnésio
MhM	Microbacia hidrográfica de Montouro
MIN	Valor mínimo
Mn	Manganês
M_o	Moda
MX	<i>Multiplexer</i> de canais
n	Porosidade
n	Número máximo de horas de sol
N	Ondulação do geoide
${}^{14}\text{N}$	Isótopo de azoto
Na	Sódio
ne	Porosidade eficaz
NH_4	Amónia
NHE	Nível hidrostático
NO_3	Nitrato
O_2	Oxigénio
OD	Oxigénio dissolvido
p	Campo primário
p	Valor do parâmetro
P	Perímetro
P	Precipitação
PDA	Assistente pessoal digital (Personal Digital Assistant)
PDOP	Diluição de precisão posicional (Positional Dilution of Precision)
pe	Potencial redox expresso como $-\log [e^-]$
PEAD	Poliétileno de alta densidade
pH	$-\log [\text{H}^+]$
P_i	Precipitação anual em cada estação
P_{BH}	Precipitação anual ponderada nas bacias hidrográficas
PO_4	Fosfato
P_{10}	Décimo percentil
P_{50}	Mediana
P_{90}	Nonagésimo percentil
Q	Caudal
q_R	Recarga média anual
r	Valor do parâmetro do método de avaliação da vulnerabilidade

$r^{\#}$	Valor modificado do parâmetro do método de avaliação da vulnerabilidade
R	Escorrência superficial
ReNEP	Rede Nacional de Estações Permanentes
RI	Índice de risco
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
Rx	Recetor ou bobine recetora ou espira recetora
s	Campo secundário
S	Coeficiente de armazenamento
S	Recarga
SA	Análise estrutural
Sal	Salinidade
S.A.R.	Taxa de adsorção de sódio
SEC	Condutividade elétrica específica para a temperatura de 25 °C (Specific Electrical Conductivity)
SERVIR	Sistema de Estações de Referência GNSS VIRTuais
sf	Propriedades da superfície
SGP	Sociedade Geológica de Portugal
SH	Excedente hídrico
S.I.	Sistema Internacional de Unidades
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SINTACS	Método de avaliação da vulnerabilidade, que inclui os parâmetros S – profundidade da água, I – infiltração, N – espessura da zona não saturada, T – tipo de solo, A – características hidrogeológicas do aquífero, C - condutividade hidráulica do aquífero e S - declive
SLd	Densidade de alinhamentos estruturais
SLD	Direção de alinhamentos estruturais
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
SO ₄	Sulfato
SMN	Serviço Meteorológico Nacional
sv	Declive e vegetação
t	Tempo
T	Transmissividade
T	Temperatura
$t_{1/2}$	Tempo de semi-vida
TDEM	Métodos no domínio tempo (Time Domain Methods)
TEM	Método transiente eletromagnético
T _{off}	Tempo após desligar equipamento
T _{on}	Tempo em que o equipamento está ligado
Turb	Turbidez
Tx	Transmissor ou bobine transmissora ou espira transmissora
vc	Valor calculado

VD	Dipolo vertical
VE	Vulnerabilidade específica
VI	Vulnerabilidade intrínseca
w	Peso ponderado
$w^{\#}$	Valor modificado do peso ponderado
WGS84	World Geodetic System 1984
z	Profundidade máxima de investigação
ΔS	Variação da água armazenada no solo
Δt	Variação do tempo
μ	Média
ρ	Resistividade
σ	Condutividade elétrica (cap.3) e desvio padrão (cap. 3 e 5)
ϕ	Diferença de fase entre os sinais do campo secundário e primário
#N/D	Não determinável

Aqui apresenta-se a definição usual de cada parâmetro, mas quando o seu significado for diferente será devidamente identificado.

Capítulo 1 - Introdução

1.1 - Enquadramento do trabalho

Os sistemas aquíferos em ambiente sedimentar encontram-se relacionados com formações detríticas e carbonatadas, cujas propriedades geológicas condicionam fortemente a sua capacidade de armazenamento e de circulação. É possível distinguir entre sistemas aquíferos porosos e cársicos. Os primeiros estão associados a formações detríticas e, maioritariamente, multicamada, e os segundos são inerentes a formações carbonatadas, com propensão para carsificação provocada pelo próprio escoamento no aquífero.

O quimismo da água subterrânea está dependente das diferentes interações físicas, químicas e biológicas que se desenvolvem durante a percolação, refletindo, igualmente, o tipo e uso do solo. Assim, o facto de a água de recarga poder conter substâncias dissolvidas ou em suspensão condiciona a qualidade da água subterrânea. Por exemplo, a infiltração e o escoamento rápido pelas estruturas cársicas, tornam estes aquíferos particularmente vulneráveis à poluição (Almeida *et al.*, 2000b), principalmente quando não existe filtração por a rocha se encontrar nua ou com solo de cobertura de reduzida espessura.

A degradação da qualidade da água subterrânea está associada a poluição com origem natural ou antrópica. A poluição natural é provocada pela circulação de águas em meios geológicos naturais que alterem significativamente a sua composição, impondo restrições ao seu consumo (Lobo-Ferreira *et al.*, 1995a). A poluição antrópica resulta da ação humana, inerente às atividades agrícolas, urbanas e industriais, podendo ser classificada como pontual ou difusa.

É importante o conhecimento mais completo possível dos recursos hídricos, particularmente dos sistemas aquíferos, para desenvolver uma eficiente gestão dos mesmos e, conseqüentemente, promover a proteção destas massas de água e assegurar a futura sustentabilidade.

A avaliação da vulnerabilidade revela-se como uma ferramenta importante na prevenção e controle da poluição da água subterrânea, ao distinguir as zonas mais vulneráveis e, conseqüentemente, apontar diretivas claras e condicionantes em fases de planeamento das atividades socioeconómicas de uma região. No entanto, os perigos resultantes da ocupação humana, nas suas diversas atividades, são os mais variados e com ocorrência temporal distinta e ocasional, o que, em algumas situações os torna imprevisíveis. Os principais impactes resultam do manuseamento de substâncias nas fases de produção, transporte, armazenagem e eliminação, bem como aquando do seu uso e aplicação.

Assim, poderá ter-se zonas onde a vulnerabilidade intrínseca, mesmo sendo reduzida, caso a carga contaminante não se verifique não teremos risco de contaminação, e outras onde a vulnerabilidade intrínseca, mesmo sendo elevada, se a exposição à carga contaminante for demasiado elevada o sistema pode não conseguir, de forma natural, evitar a poluição.

Em síntese, a avaliação do risco inclui os seguintes passos: caracterização hidrogeológica do sistema ou unidade aquíferos com o desenvolvimento de um modelo hidrogeológico conceptual, que possibilite determinar a vulnerabilidade intrínseca e a identificação dos potenciais poluentes. O recurso a técnicas de cartografia facilita a compilação da informação,

bem como a implementação de metodologias de análise, facilitando, igualmente, a sua utilização como ferramentas de gestão e proteção dos recursos.

O presente trabalho propõe-se caracterizar o risco de contaminação em duas áreas de estudo relativas a sistemas aquíferos em ambiente sedimentar, nomeadamente, o Cretácico de Aveiro e o Cárstico da Bairrada. O trabalho tem, igualmente, como propósito constituir um contributo para a caracterização hidrogeológica e hidroquímica daquelas áreas.

Foram considerados dois pontos de descarga daqueles sistemas aquíferos, concretamente as exurgências de Montouro e de Olhos da Fervença. A água de Montouro é uma água mineral, que revela propriedades químicas de circulação em contacto com rochas evaporíticas de idade hetangiana, enquanto a água de Olhos da Fervença tem características químicas típicas da circulação em formações carbonatadas e que, neste caso, possibilitam a sua utilização para consumo humano.

Delimitaram-se duas bacias hidrográficas com influência sobre as exurgências. Estas áreas localizam-se na Orla Mesocenozóica Ocidental, nos concelhos de Cantanhede e de Montemor-o-Velho, e fazem parte integrante da bacia hidrográfica do rio Vouga.

1.2 - Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é proceder à avaliação do risco de contaminação em sistemas hidrogeológicos sedimentares, sendo um dos sistemas aquíferos carsificado, e apresentar propostas de minimização do risco adequadas às áreas de estudo.

No âmbito da caracterização do risco de contaminação, foram delineados objetivos específicos, nomeadamente:

- a análise comparativa de métodos de avaliação de vulnerabilidade intrínseca;
- validação do método de vulnerabilidade intrínseca para as áreas de estudo e possível modificação/redefinição do método com base nas características das respetivas áreas;
- elaboração de cartas de vulnerabilidade intrínseca;
- identificação, caracterização dos principais perigos e quantificação do índice de perigosidade;
- elaboração de cartas do índice de perigosidade;
- elaboração de cartas do índice de risco.

Para que a execução destas tarefas fosse possível, foi necessário, previamente, reunir informação e desenvolver trabalhos multidisciplinares que cumpriram os seguintes objetivos:

- conhecer a geologia e correlacionar com as unidades hidrogeológicas;
- identificar estruturas e avaliar a sua relação com as unidades hidrogeológicas;
- detetar os principais fluxos de água subterrânea;
- identificar as principais zonas de recarga;
- desenvolver um modelo hidrogeológico conceptual;
- quantificar a recarga aquífera, através da análise comparativa de vários métodos;
- caracterizar quimicamente as águas subterrâneas e identificar os processos hidrogeoquímicos;
- apontar principais fontes contaminantes.

O estudo desenvolvido pretende enriquecer o conhecimento hidrogeológico e hidroquímico das áreas em estudo e, simultaneamente, constituir um contributo para o conhecimento do risco da água subterrânea daquelas áreas, podendo tornar-se uma ferramenta útil aos decisores da gestão do risco.

O trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia e técnica melhorada de quantificação do risco de contaminação, propondo uma abordagem que engloba distintos parâmetros.

1.3 - Estado da arte

O tema em estudo, isto é, risco de contaminação de água subterrânea e a sua caracterização, teve desenvolvimentos importantes nas últimas décadas, consequência, sobretudo, de problemas cada vez mais significativos que têm vindo a afetar a qualidade deste recurso. Foram sendo desenvolvidas metodologias de análise e de caracterização da vulnerabilidade intrínseca e específica, que ganharam visibilidade em vários casos de estudo.

Apresenta-se, como exemplo, os trabalhos de Kim & Hamm (1999) na Coreia do Sul, de Civita & De Maio (2004) em Itália, de Antonakos & Lambrakis (2007) na Grécia, de Sener *et al.* (2009) na Turquia, de Vías *et al.* (2010) na Europa, de Majandang & Sarapirome (2013) na Tailândia, de Huneau *et al.* (2013) em França, entre outros.

Também, no nosso país têm sido desenvolvidos vários estudos relativos à avaliação da vulnerabilidade e risco de contaminação, de que é exemplo o trabalho à escala nacional de Lobo-Ferreira & Oliveira (1993), bem como os casos na região do Alentejo (Francés *et al.*, 2001), das Campinas de Faro e da Luz (Stigter *et al.*, 2006), da cidade do Porto (Afonso *et al.*, 2010), na região do nordeste de Portugal (Fraga *et al.*, 2013), do Maciço Calcário Estremenho (Oliveira *et al.*, 2014), entre outros.

No que diz respeito a cada uma das exurgências e das áreas de estudo, têm sido efetuados alguns trabalhos específicos que se apresentam de seguida e em separado, no entanto, previamente far-se-á referência a alguns estudos de âmbito diverso que ocorreram na região.

As investigações desenvolvidas na região relativas a aspetos geológicos são várias, citando-se apenas algumas a título de exemplo.

Os documentos elaborados por Choffat (1889; 1897b; 1900) constituem uma referência sobre a geologia e a paleontologia da região, a que se juntam os trabalhos de Carrington da Costa (1937), de Soares (1966) e de Soares *et al.* (1982; 1988; 1993). Soares de Carvalho (1952; 1954; 1964), Almeida (1997) e Dinis (2004) apresentam trabalhos sobre a morfologia e a cobertura sedimentar.

As cartas geológicas de Portugal, escala 1/50000, folha 16-A Aveiro (Teixeira & Zbyszewski, 1976), folha 16-C Vagos (Barbosa, 1981a) e folha 19-A Cantanhede (Barbosa *et al.*, 1988) são, igualmente, trabalhos de registo.

A mineralogia, sedimentologia e geoquímica da fração fina dos sedimentos cretácicos na bacia de Aveiro foram alvo de uma investigação detalhada de Rocha (1993).

Alguns trabalhos relativos à neotectónica e a sua importância na evolução geomorfológica foram desenvolvidos por Cabral (1995) e Cabral & Ribeiro (1988; 1989).

A Bacia Lusitaniana tem sido amplamente estudada, fazendo-se menção às publicações de Wilson *et al.* (1989), de Duarte & Soares (2002), de Alves *et al.* (2003) e de Kullberg *et al.* (2006; 2013), onde são abordados temas como estratigrafia, paleogeografia e tectónica.

No âmbito da aplicação da geofísica, destaca-se os estudos realizados por Casas *et al.* (1995) para a definição de um modelo preliminar da estrutura e topografia do soco de um setor da Ria de Aveiro, e por Figueiredo (2001) para definição da topografia do *bedrock* e das estruturas geológicas profundas na região do Baixo Vouga.

Estudos hidrogeológicos de caracterização dos sistemas aquíferos da região foram realizados por Lauerjat *et al.* (1983), Peixinho de Cristo (1985), Marques da Silva (1990; 1992), Almeida *et al.* (1999), Condesso de Melo *et al.* (1999), Condesso de Melo (2002) e Condesso de Melo & Marques da Silva (2008), entre outros.

Almeida *et al.* (2000c; 2000d; 2000e; 2000f; 2000g) compilaram uma síntese de informação sobre os sistemas aquíferos de Portugal Continental, onde se incluem os das áreas em estudo.

1.3.1 - Nascente de Montouro

A água da nascente de Montouro é uma água mineralizada, que tem referência em diversos documentos antigos, à semelhança de outras águas do mesmo tipo. Os trabalhos de Acciaiuoli (1944; 1947; 1952) são exemplo da compilação e descrição das diversas águas de Portugal, reportando a sua localização, origem, análise química e uso medicinal. De seguida, apresenta-se uma resenha histórica sobre a nascente de Montouro, referindo-se alguns dos textos que lhe fazem menção.

Remonta ao ano de 1905 a descoberta da água mineralizada de Montouro ou Montoiro (como consta do relatório do Dr. José Gomes Lopes de 26 de março de 1907). Manuel Francisco Miraldo, da povoação dos Covões, ao caçar nos pinhais das proximidades de Montouro sentindo sede, e por informação de uma habitante local, dirigiu-se ao local onde a nascente emerge. Fora advertido que “não gostaria da água” e efetivamente ao fazer a prova apercebeu-se que esta tinha “um sabor estranho, como de salgado”, no entanto, ocorreu-lhe de imediato a ideia de aquela ser uma “água minero-medicinal com virtudes therapeuticas valiosas” (Lopes, 1907).

Com a publicitação desta informação a água tornou-se de uso corrente e muitos foram os que passaram a deslocar-se à mesma em busca de cura para as várias maleitas, ao ponto de não serem suficientes as “aguas da pequena nascente” (Lopes, 1907). A água e as suas propriedades terapêuticas, associadas a alguns casos de cura (por exemplo, feridas, eczemas, estômago, oftalmia) ficaram conhecidas, atraindo pessoas não só do concelho de Cantanhede, como também dos concelhos de Vagos e Ílhavo. A água era cedida de forma gratuita.

Em 1906, Charles Lepierre fez uma análise química da água concluindo que se tratava de uma água hipersalina, classificando-a como água cloretada sódica, muito magnésica e carbonatada cálcica ou magnésica (Lepierre, 1906; Lopes, 1907; Luzes *et al.*, 1934-1935; Acciaiuoli, 1952). Foram identificadas várias indicações terapêuticas, que levaram a pensar na criação de termas.

Joaquim Pereira Machado, em 1915, submete um pedido de “concessão de licença para a exploração da nascente d’água mineromedicinal do Montouro”, como consta do Diário do Governo nº 273, II série, de 24 de novembro de 1915 (Diário do Governo nº 273, 1915), o qual viria a ser concedido como referido no Boletim de Minas relativo ao ano de 1915 (Boletim de Minas, 1917). Seis anos mais tarde, o relatório de reconhecimento elaborado por António Maria de Mendonça (Mendonça, 1921; Acciaiuoli, 1944) refere a existência de “uma pequena poça escavada no terreno” onde a água fica acumulada, sendo alguma levada em vasilhas para a empregarem em casa em usos terapêuticos. Um documento, datado de dezembro de 1922, assinado pelo médico da Inspeção d’Águas, atesta que as águas da nascente de Montouro devem ser consideradas como mineromedicinais.

O alvará de 28 de abril de 1923, publicado em Diário do Governo nº 104, II série, de 07 de maio de 1923 (Diário do Governo nº 104, 1923) concede definitivamente, por tempo ilimitado, a concessão da nascente de água mineral a Joaquim Pereira Machado, com uma área reservada de 50 hectares. No entanto, viria a ser declarada abandonada, por Decreto de 27 de janeiro de 1936, publicado em Diário do Governo nº 26, II série, de 01 de fevereiro de 1936 (Diário do Governo nº 26, 1936), sem que obra alguma tenha sido executada para permitir a sua captação e, conseqüentemente, sem a existência de qualquer exploração comercial (Soares, 1935). O relatório anual da Inspeção das Águas relativo ao ano de 1936, documenta também o abandono da nascente de Montouro (Boletim de Minas, 1938).

O Diário do Governo nº 180, de 04 de agosto de 1936 (Diário do Governo nº 180, 1936), indica que não houve pretendentes à concessão da nascente de águas minerais de Montouro. Este facto viria a ser alterado sete anos mais tarde. Em 1943, a Águas de Montouro, Sociedade por Quotas de Responsabilidade Limitada, solicita a concessão da nascente, vendo o seu pedido atendido mas sujeito a condicionantes, nomeadamente, a apresentação do projeto de captagem conforme Alvará de 14 de agosto de 1943, com publicação em Diário do Governo nº 197, III série, de 24 de agosto de 1943 (Diário do Governo nº 197, 1943).

Na sequência deste deferimento, o Eng. Viriato de Sousa Campos elabora um anteprojeto de captagem da nascente (Campos, 1944; Acciaiuoli, 1947) começando por referir que a nascente se encontra no estado primitivo, sem que desde o primeiro pedido de concessão quaisquer obras tenham sido efetuadas, e a necessidade de melhoria dos meios de comunicação, elemento fundamental para o futuro das águas mineromedicinais. O pequeno caudal revelou-se como outro fator condicionador do sucesso da implementação das termas, tendo sido realizada prospeção mecânica na tentativa de encontrar mais caudal. Foi encontrada uma água de sabor mais fortemente salgado (Campos, 1944), mas os trabalhos não puderam continuar devido às fortes chuvas, ficando a ideia de prosseguir as pesquisas no começo do próximo verão. O anteprojeto frisa os ótimos resultados no tratamento de doenças de pele, como eczemas. Em publicação do Diário do Governo nº 250, III série, de 26 de outubro de 1945 dá-se conta da aprovação deste anteprojeto (Diário do Governo nº 250, 1945).

Apesar da intenção de regressar para continuar os trabalhos de pesquisa, não há registo de que tal tenha acontecido. No Novo Aquilégio (2008), confirma-se isto mesmo com uma referência de Acciaiuoli (Acciaiuoli, 1953) que constata que a nascente não tem condições económicas de desenvolvimento, não existindo, nem captagem técnica da água nem estabelecimento hidromineral, no princípio da década de 50.

Em 1951, Contreiras faz referência à água de Montouro, classifica-a como bicarbonatada mista e salienta as indicações terapêuticas para o aparelho digestivo e rins (Contreiras, 1951).

No Anuário Médico-Hidrológico de Portugal, Mata, referindo-se à nascente de Montouro, indica que o concessionário não tem a exploração em atividade, apesar de pagar os impostos ao Estado (Mata, 1963). A Sociedade Águas de Montouro acabaria por ser dissolvida no ano seguinte, em janeiro de 1964.

Em 02 de outubro de 1964, o Diário do Governo nº 232, III série, publicava a declaração de abandono da concessão da nascente de água mineromedicinal nº 111 de Montouro (Diário do Governo nº 232, 1964), como também documentado no movimento de processos do Boletim de Minas (Boletim de Minas, 1964).

Desde então, a nascente de água mineromedicinal de Montouro encontra-se disponível para concessão, como referido na publicação do Diário do Governo nº 299, III série, de 23 de dezembro de 1964 (Diário do Governo nº 299, 1964), não havendo exploração até aos dias de hoje.

Numa referência a nascentes da Orla Mesocenozóica Ocidental, Teixeira & Gonçalves (1980) referem a água de Montouro, dizendo que é hipersalina, cloretada sódica, magnésica e cálcica, levemente sulfatada e carbonatada, que brota de terrenos do Cretácico superior. Em Carvalho *et al.* (2012b) a água de Montouro é indicada como cloretada, com mineralização total entre 1000 e 10000 mg/L.

No que diz respeito à informação mapeada sobre as nascentes minerais de Portugal, uma das primeiras cartas é da autoria de Acciaiuoli, designada “Carte Géochimique de Portugal”, que está incluída no livro *Le Portugal Hydromineral* (Acciaiuoli, 1952), referenciando Montouro como uma água cloretada mista (Figura 1.1).

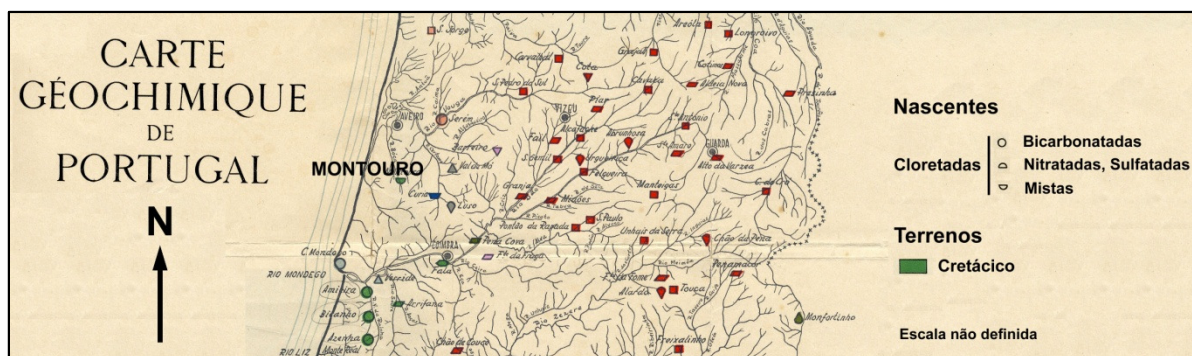


Figura 1.1 - Localização da nascente de Montouro (adaptado da Carta Géochimique de Portugal, escala não definida, in (Acciaiuoli, 1952)).

Mais tarde, Fernando Moitinho de Almeida, com a colaboração de J. Costa Moura (Almeida & Moura, 1970), compilou de forma mais completa essa informação, resultando a Carta das Nascentes Minerais de Portugal, e estando a nascente classificada como cloretada sódica (Figura 1.2). Em 1992, Calado atualizou esta carta com a publicação em *Atlas do Ambiente – Carta de Nascentes Minerais* (Calado, 1992) e respetiva notícia explicativa (Calado, 1995). A Figura 1.3 apresenta um extrato da última carta referida.

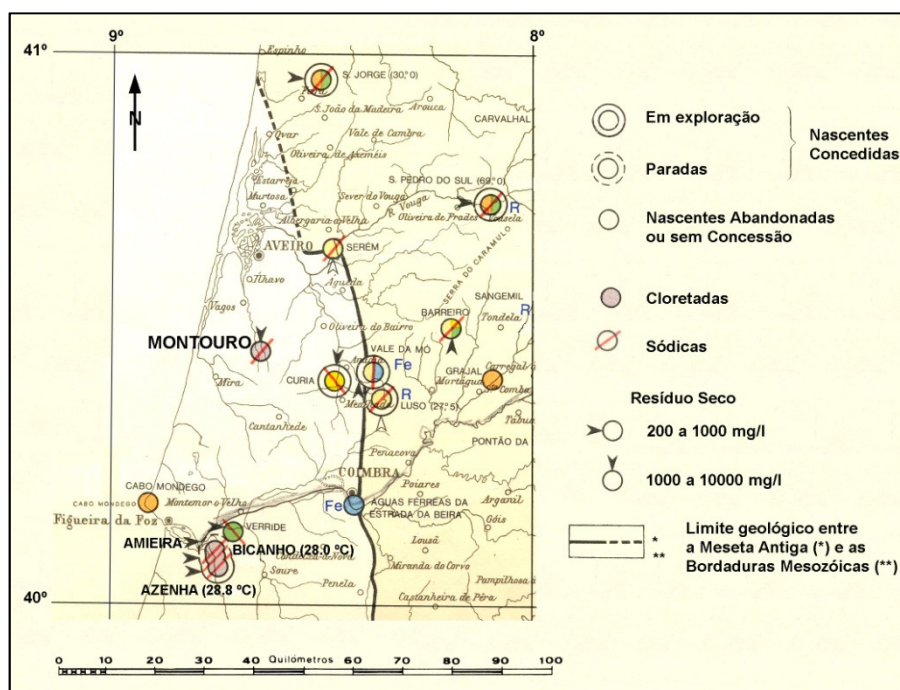


Figura 1.2 - Localização da nascente de Montouro (adaptado da Carta das Nascentes Minerais de Portugal, escala 1/1000000, 1970 in (Correia et al., 2008)).

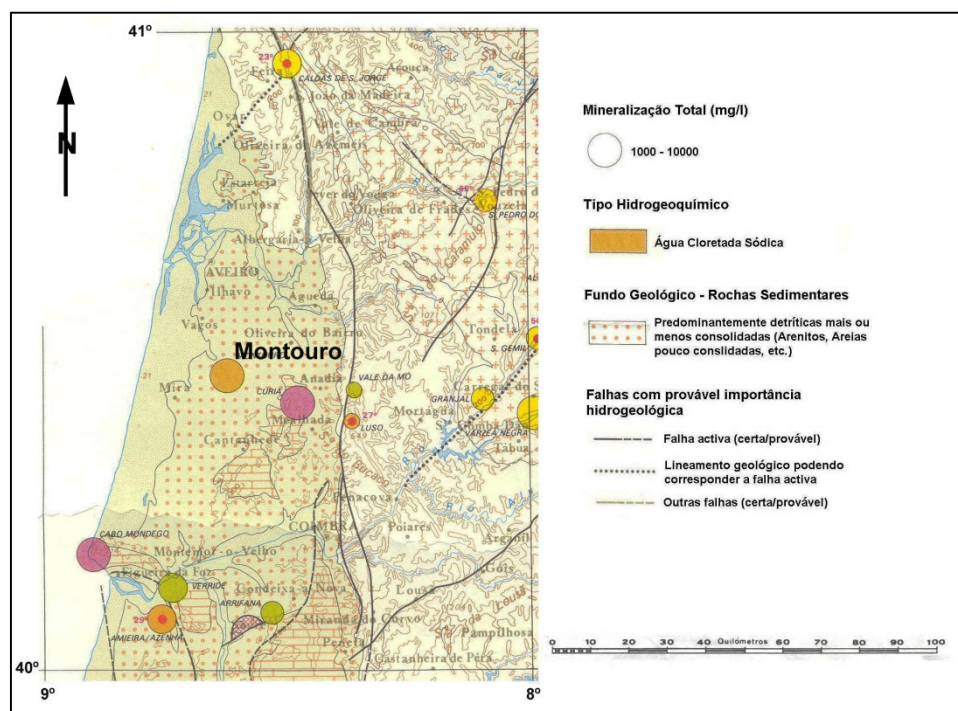


Figura 1.3 - Localização e caracterização da nascente de Montouro (adaptado de Atlas do Ambiente – Carta de Nascentes Minerais, escala 1/1000000, 1992 in (Correia et al., 2010a)).

Calado (1995) refere que na Orla Mesocenozóica sobressaem águas muito mineralizadas, sobretudo cloretadas sódicas e sulfatadas cálcicas, que denunciam a presença de formações ricas em evaporitos. De salientar que a água da nascente de Montouro, de natureza cloretada

sódica, está afastada, cerca de, 43 km para NE de outras águas com características semelhantes, na proximidade de Soure. As nascentes da Amieira, Azenha e Bicanho têm registo de nascentes de água mineralizada de natureza idêntica (Figura 1.2).

Os trabalhos mais recentes relativos à nascente de Montouro e sua envolvente incluem campanhas de monitorização de pontos de água e trabalhos de prospeção eletromagnética (Correia *et al.*, 2008; Correia *et al.*, 2010a), bem como a caracterização química das águas e a análise isotópica de trítio da água da nascente (Correia *et al.*, 2014a).

1.3.2 - Exsurgência Olhos da Fervença

Olhos da Fervença tem referência no Aquilégio Medicinal (Henriques, 1998), nas “fótes frias”, como Fonte de Cadima (Figura 1.4), com destaque para o facto de sorver tudo quanto nela se lance. Algumas estórias sobre a exsurgência contam que “uma vez uma junta de bois com uma carroça, ...desapareceram nesse buraco que chupava a água...” (Novo Aquilégio, 2008).

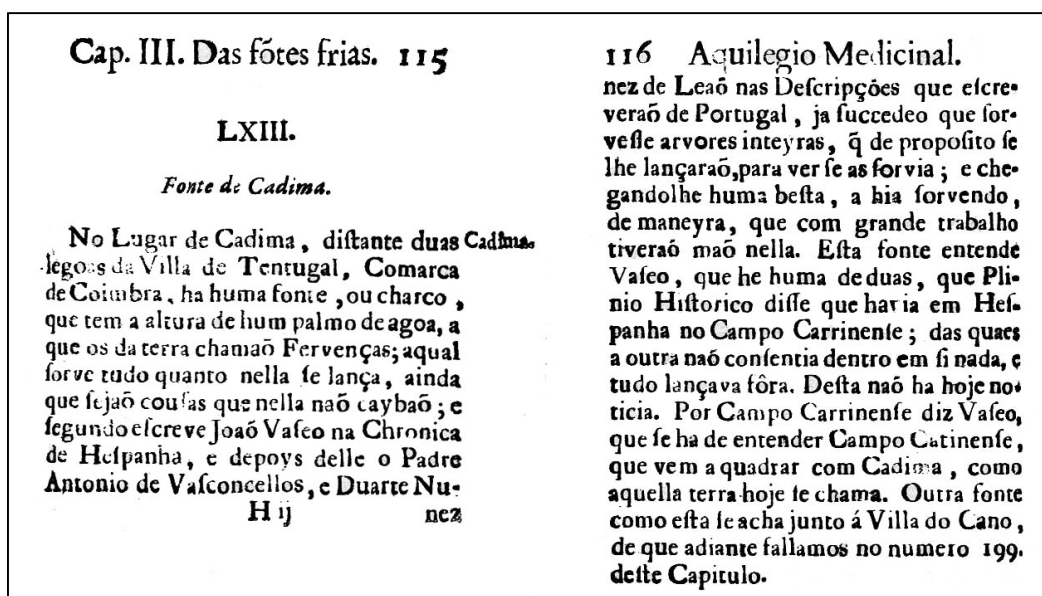


Figura 1.4 - Fonte de Cadima (adaptado de Henriques, 1998).

Olhos da Fervença distingue-se pelo facto de ser uma descarga natural, que continuamente borbulha na zona de aluvião da ribeira, com elevados caudais (Figura 1.5). Constituiu interesse de estudo e em 1960 era confirmada a elevada capacidade produtiva, deixando antever a exploração desta água. Em 1967, foi feito um conjunto de oito poços, dois dos quais permaneceram em funcionamento, e em 1970 o concelho de Cantanhede começa a ser abastecido a partir destas captações. Foi aberto novo poço em 1982, com um caudal médio de 40 L/s (Novo Aquilégio, 2008) e mais tarde a capacidade total de captação passou para 215 L/s.

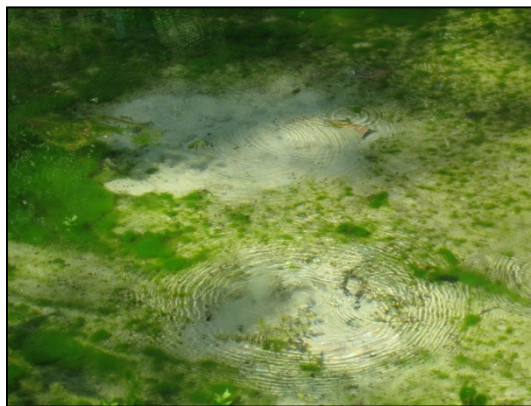


Figura 1.5 - Pormenor do borbulhar da exurgência de Olhos da Ferveça.

A captação, tratamento e distribuição da água era da responsabilidade da Câmara Municipal de Cantanhede e, em 1997, foi proposta à Direção Regional do Ambiente e Recursos Naturais a construção do Parque e Praia Fluvial de Olhos da Ferveça. Estes estudos foram desenvolvidos por uma equipa ligada à Universidade de Aveiro, coordenada por Marques da Silva (2000), tendo sido apresentado um trabalho preliminar por Correia & Marques da Silva (1999). Também no âmbito deste trabalho foi realizada uma campanha de prospeção geofísica com o objetivo de identificar a presença de estruturas geológicas na zona, e cuja descrição e resultados viriam a ser objeto da dissertação de doutoramento de Heen (2002).

Em 2002, a Inova – Empresa de Desenvolvimento Económico e Social de Cantanhede, EEM, fica responsável pela gestão do abastecimento público de água. Este abastecimento é garantido no concelho de Cantanhede, mas existe também exportação para freguesias de concelhos como Mira, Montemor-o-Velho e Coimbra.

A definição dos perímetros de proteção das captações dos Olhos da Ferveça culminou com a publicação da Portaria nº 195/2010 de 8 de Abril (Diário da República nº 68, 2010), resultante dos estudos realizados por Marques da Silva (2009).

Em 2010, Correia *et al.* (2010b) realizaram trabalhos de prospeção eletromagnética na envolvente da exurgência Olhos da Ferveça.

Em 2012, a captação processava-se em três instalações com 19008 m³/dia de capacidade (Inova-EEM, 2012a). A água foi classificada física e quimicamente como potável, não agressiva, carecendo apenas de tratamento bacteriológico preventivo (Inova-EEM, 2012a; 2013a; 2014a). A água captada, considerando o controlo de qualidade realizado em outubro de 2008 pela entidade exploradora, tem 19 °C de temperatura, pH (a 20 °C) 7.5, e 21.4 mg/L de cloretos (Inova-EEM, 2012a; 2013a; 2014a).

1.4 - Metodologia desenvolvida

A metodologia implementada neste trabalho incluiu a identificação das áreas de estudo, através da delimitação das bacias hidrográficas de linhas de água próximas das exurgências de Olhos da Ferveça e de Montouro.

Procedeu-se à realização de pesquisa bibliográfica relativa a temas diversos que possibilitou efetuar a caracterização topográfica, climatológica, hidrográfica, geomorfológica, geológica, estrutural, hidrogeológica das bacias hidrográficas, bem como a tipologia e uso dos solos.

Desenvolveu-se trabalho de campo que englobou: (1) campanhas de prospeção eletromagnética no domínio frequência e tempo; (2) inventariação de pontos de água; (3) campanhas de medição de níveis piezométricos; (4) campanhas de amostragem de água; (5) recolha de amostra de argila; e (6) inventariação e identificação de usos do solo associados a perigosidade.

O trabalho laboratorial promoveu a realização de análises química e isotópica da água amostrada e a identificação dos minerais presentes na matriz argilosa.

Com a obtenção de diferentes tipos de dados, foi necessário compilar a informação de modo a possibilitar o seu processamento e análise. Também se procedeu à elaboração de bases de dados com informação relativa à identificação, localização e caracterização (diâmetro, profundidade e altura do muro) dos pontos de água inventariados, aos valores das medições piezométricas nas diferentes campanhas, aos resultados dos parâmetros das análises químicas da água, aos resultados da análise isotópica ao trítio, aos valores de condutividade elétrica aparente e de resistividade, aos valores de precipitação e temperatura, etc.

O processamento de dados levou à obtenção das altitudes elipsoidais dos pontos de água, à elaboração de cartas piezométricas, ao cálculo de balanços hídricos e quantificação da recarga aquífera, representação bidimensional de perfis eletromagnéticos com identificação de alinhamentos condutivos, obtenção de índices hidrogeoquímicos, representação da fácies hidroquímica. Foram construídos mapas (usando dados medidos ou obtidos em bibliografia) com informação diversa, tal como: alinhamentos estruturais, geologia, hidrografia, sistemas aquíferos, distribuição dos valores dos parâmetros químicos das águas, tipologia dos solos, declives, índice de vulnerabilidade intrínseca, índice de perigosidade, índice de risco, entre outros.

No desenvolvimento do trabalho utilizaram-se *softwares* distintos, nomeadamente PhreeqC (Parkhurst & Appelo, 1999) na quantificação dos índices de saturação, Ashtech Solutions (2002) para correção e obtenção das altitudes elipsoidais, Rockworks (RockWare Inc., 2008) que permitiu a reprodução em diagrama Piper das amostras de água, a representação dos perfis eletromagnéticos e a elaboração do esquema do modelo conceptual, Surfer (Golden Software Inc., 2009) na representação das cartas piezométricas e, também, dos perfis eletromagnéticos, SPSS (IBM, 2013) na quantificação de correlações, ArcGIS (ESRI Inc., 2010) para a execução de vários mapas, bem como a implementação da metodologia de análise da vulnerabilidade, perigosidade e risco. A utilização do Excel (Microsoft Corporation, 2007) foi recorrente e com inúmeras finalidades (gráficos, tabelas, etc.).

Durante o decorrer deste estudo foram sendo realizadas pesquisas bibliográficas relativas aos assuntos em análise e sempre que necessário, ou considerado pertinente, introduzidas atualizações.

1.5 - Estrutura da tese

No presente trabalho é feita uma abordagem a diversos temas, inerentes ao estudo desenvolvido e organizados num conjunto de sete capítulos. A tese encontra-se estruturada como se descreve de seguida.

O capítulo 1, apresenta uma breve introdução ao tema em estudo (risco de contaminação), define os objetivos do trabalho, apresenta referência a alguns trabalhos desenvolvidos nas áreas de estudo e a trabalhos relativos à análise de risco, expõe a metodologia desenvolvida e a organização deste documento.

No capítulo 2, efetua-se o enquadramento geral das áreas de estudo, com referência à localização geográfica, à topografia, à geomorfologia, bem como ao clima, à hidrografia, à geologia, à estrutural, à mineralogia e à tipologia e ocupação dos solos.

O capítulo 3, diz respeito à prospeção geofísica, nomeadamente a descrição dos métodos eletromagnéticos no domínio tempo e frequência, do trabalho de campo realizado e consequente processamento, análise e interpretação de dados que conduziram à identificação de possíveis relações hidrogeológicas.

O capítulo 4, dedica-se à hidrogeologia, com apresentação das unidades hidrogeológicas e respetivos parâmetros hidráulicos, do trabalho de inventariação e medição de pontos de água, que possibilitou a construção de cartas piezométricas. Apresenta-se uma proposta de modelo conceptual e procede-se ao cálculo da recarga aquífera, com base em diferentes métodos.

O capítulo 5, reporta ao estudo hidroquímico, descrevendo a amostragem e métodos analíticos utilizados, com síntese dos resultados de cada campanha, que permitiram caracterizar a fácies hidroquímica e interpretar a evolução hidroquímica. Abordam-se os processos hidrogeoquímicos e a utilização do isótopo radioativo do hidrogénio para datação das águas subterrâneas.

O capítulo 6, centra-se na temática vulnerabilidade, perigosidade e risco. Apresenta-se a fundamentação teórica de alguns métodos, a caracterização da vulnerabilidade intrínseca, a quantificação do índice de perigosidade e, posteriormente, a determinação do índice de risco ou vulnerabilidade específica, incluindo a representação cartográfica daqueles índices. No processo de cálculo dos índices foram propostas e introduzidas alterações e/ou modificações, decorrentes das especificidades dos locais de estudo. Os resultados são analisados e é incluída uma reflexão crítica dos métodos, considerando a sua aplicação em cada local de estudo. Inclui-se uma proposta de medidas de minimização do risco de contaminação, adequadas às áreas de estudo.

O capítulo 7, finaliza este trabalho, expondo as considerações finais e fazendo referência ao potencial desenvolvimento de trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Enquadramento geral

No âmbito do estudo das exsurgências de Montouro e de Olhos da Ferverença, entendeu-se como pertinente definir áreas enquadrantes a caracterizar, como tal, optou-se pela delimitação da bacia hidrográfica da linha de água mais próxima de cada ponto de água, por se considerar a proximidade espacial entre o sistema hidrogeológico e a área assim delimitada. Estas áreas serão designadas microbacia hidrográfica de Montouro (MhM) e bacia hidrográfica de Ferverença (BhF), por uma questão de simplificação e mais fácil relação com cada uma das exsurgências.

Este capítulo apresenta a localização das zonas em estudo e faz uma abordagem à topografia, geomorfologia, climatologia, hidrografia, geologia, estratigrafia, petrografia e enquadramento estrutural das respetivas áreas e da região, cuja importância ao estudo desenvolvido seja relevante. Apresenta-se, também, a caracterização pedológica dos solos e define-se o seu uso e ocupação.

2.1 - Localização geográfica

Ambas as exsurgências – Montouro e Olhos da Ferverença – inserem-se no concelho de Cantanhede, distrito de Coimbra. Estão localizadas, respetivamente, nas freguesias de Covões e Cadima (Figura 2.1), em povoações com os mesmos nomes das nascentes.

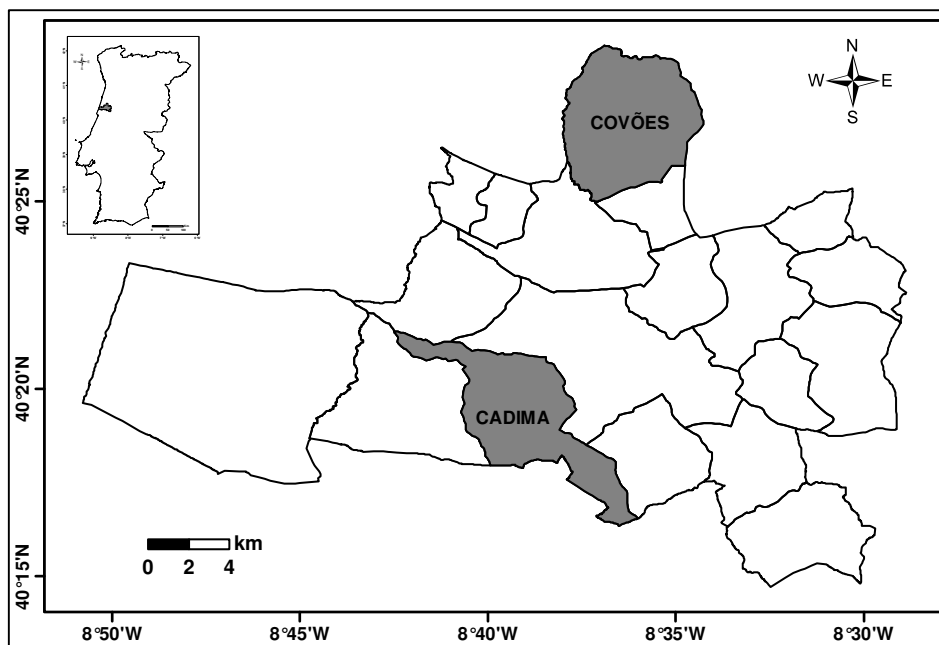


Figura 2.1 - Concelho de Cantanhede com a identificação das freguesias de Covões e Cadima (adaptado de IGP, 2013).

A nascente de Montouro, também conhecida como “poço salgado” (Figura 2.2), está situada na berma de um caminho rural da localidade de Montouro, encontra-se a oeste da povoação e tem

como coordenadas geográficas latitude de 40.460347° N, longitude de 8.623379° W e 87.437 m de altitude elipsoidal, referenciadas em termos de WGS 84 (World Geodetic System – 1984). A zona delimitada para estudo é a bacia hidrográfica duma linha de água afluente do Ribeiro de Mesas, que evolui nas proximidades da nascente (Figura 2.3 e Figura 2.6), e com representação na Carta Militar de Portugal nº 207 de Vilarinho do Bairro (Anadia), escala 1/25000 (IGeoE, 2001a). Nesta área, as altitudes elipsoidais variam entre cerca de 74 m e 146 m. A microbacia delimitada tem 6.4 km^2 de área plana e um perímetro de 14.2 km.



Figura 2.2 - Imagem do poço salgado (nascente) de Montouro.

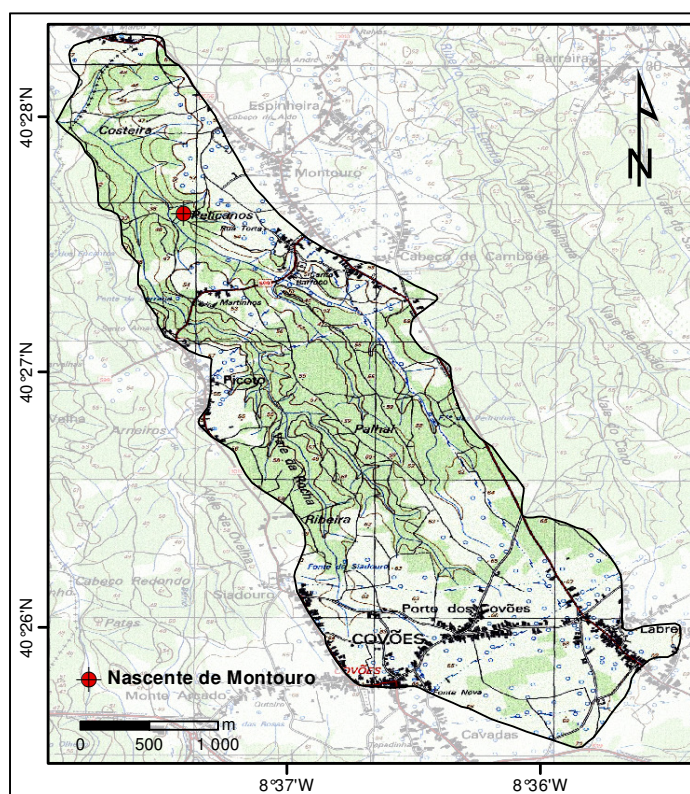


Figura 2.3 - Área de estudo em Montouro, sobre fragmento da Carta Militar de Portugal nº 207 (adaptado de IGeoE, 2001a).

A exurgência de Olhos da Ferverença apresenta coordenadas geográficas com latitude de 40.348097° N, longitude de 8.695455° W e a altitude elipsoidal é de 82.202 m, segundo

WGS 84. Ocorre no leito e na margem de uma linha de água, cartografada como Vala dos Moinhos ou Ribeira da Corujeira (Figura 2.4). Na Figura 2.5 e na Figura 2.6 está representada a área delimitada para o presente estudo, encontrando-se integrada na bacia hidrográfica da referida linha de água, e que se distribui pelas Cartas Militares de Portugal nº 217 de Tocha (Cantanhede), nº 218 de Cantanhede, nº 228 de Quaiaios (Figueira da Foz) e nº 229 de Ançã (Cantanhede), com a escala 1/25000 (IGeoE, 2001b; 2001c; 2001d; 2001e).



Figura 2.4 - Pormenor da exsurgência de Olhos da Ferveça (a) e das respetivas captações (b).

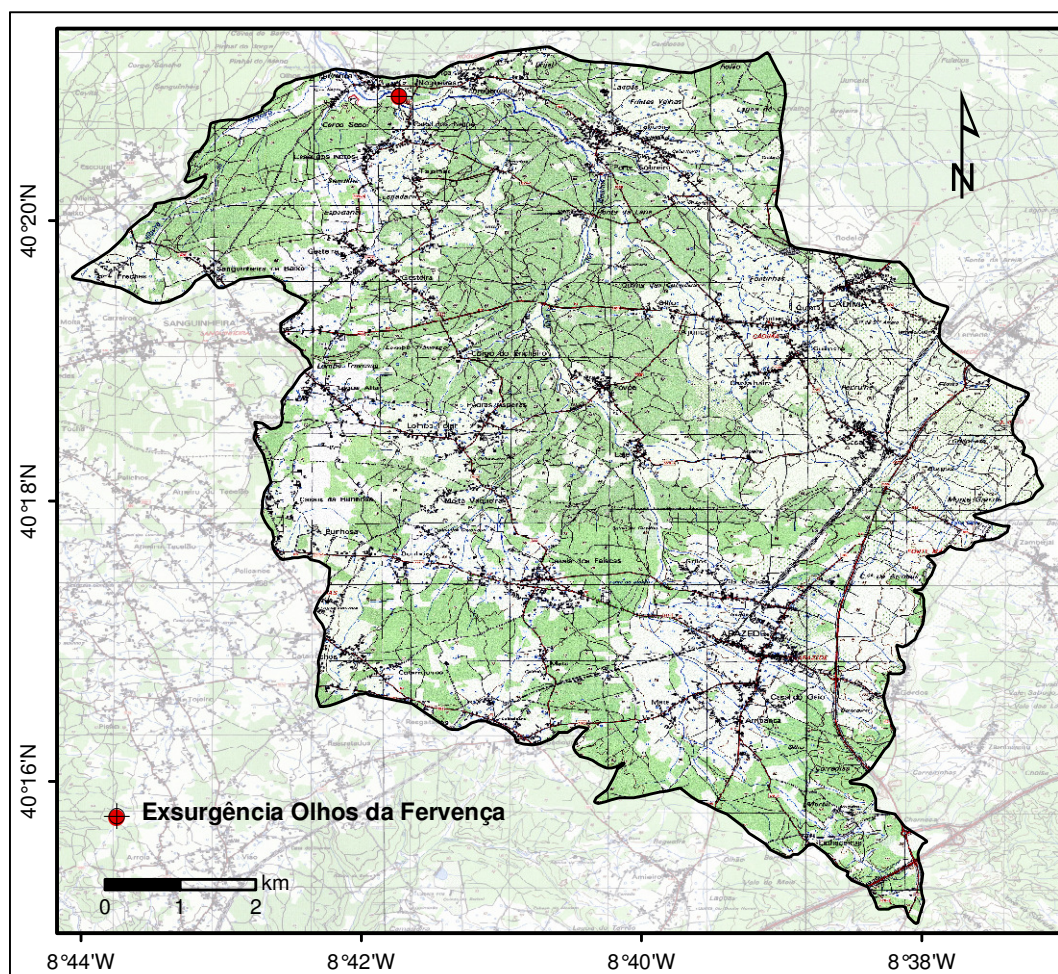


Figura 2.5 - Área de estudo enquadrante da exsurgência de Olhos da Ferveça, sobre fragmento das Cartas Militares de Portugal nº 217, 218, 228 e 229 (adaptado de IGeoE, 2001b; 2001c; 2001d; 2001e).

A área em estudo estende-se não apenas ao concelho de Cantanhede, mas também ao de Montemor-o-Velho, como se visualiza na Figura 2.6. A bacia hidrográfica de Ferverça apresenta uma área plana de 61.2 km², tem um perímetro de 43.5 km e as altitudes elipsoidais variam de, aproximadamente, 68 m a 198 m.

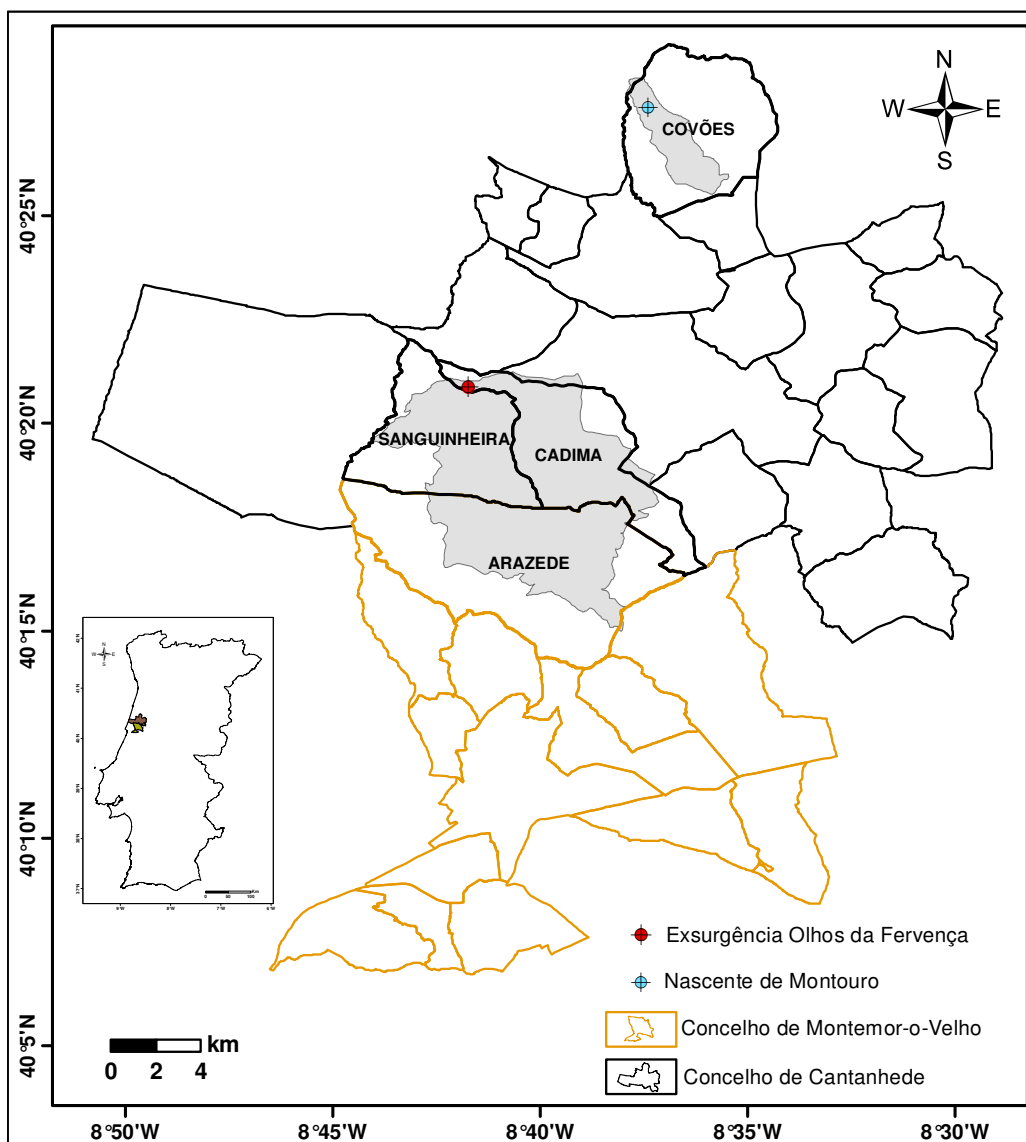


Figura 2.6 - Enquadramento regional-administrativo das áreas de estudo (adaptado de IGP, 2013).

2.2 - Topografia e Geomorfologia

As zonas em estudo estão, aproximadamente, compreendidas entre os paralelos de latitude 40°15' N e 40°28' N e entre os meridianos de longitude 8°35' W e 8°44' W, e estão integradas na Orla Mesocenozóica Ocidental (Figura 2.7), sendo locais relativamente aplanados e de baixa altitude. A Orla Mesocenozóica Ocidental caracteriza-se por apresentar geomorfologia suave, grande espessura de sedimentos, colinas calcárias e vales amplos, pouco profundos e com aluvionamento significativo (Almeida *et al.*, 1999). Nos níveis inferiores da sequência sedimentar ocorre frequentemente um complexo evaporítico que, em vários locais desta região,

origina relevos diapíricos (Lobo-Ferreira *et al.*, 1995a). Este relevo de Portugal central e respetiva evolução, segundo Cunha & Martins (2004), foram condicionados pela estrutura e litologia do soco hercínico, bem como pela história geológica das margens ibéricas, em particular a ocidental.

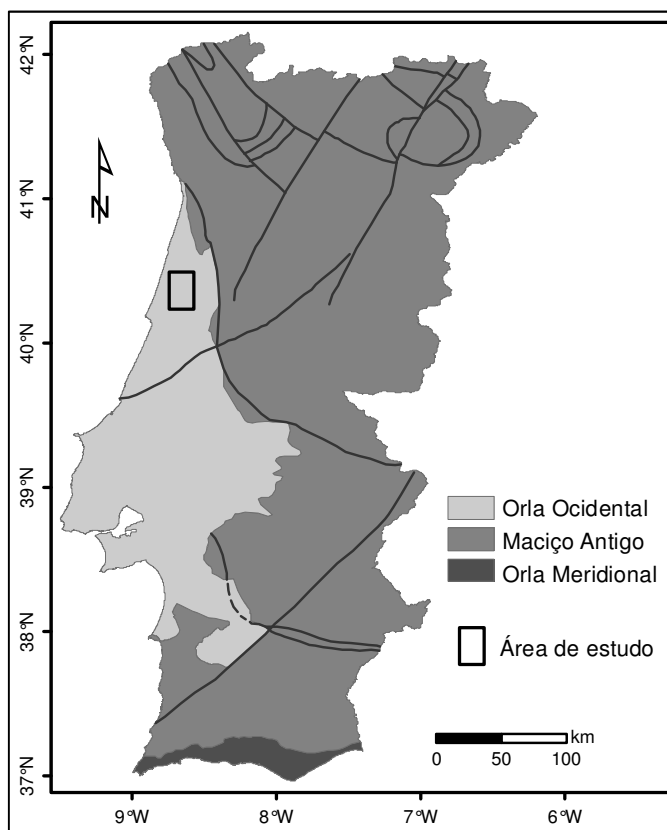


Figura 2.7 - Localização das áreas de estudo na Orla Mesocenozóica Ocidental (adaptado de Ribeiro *et al.*, 1979).

O “horst” de Cantanhede, que a sul do Vouga é a primeira elevação a modificar a planície, exerce influência significativa no controlo da geologia aflorante, assim como da circulação subterrânea e superficial da água (Marques da Silva, 2009). Separa as bacias hidrográficas do Mondego, a sul, da do Vouga, a norte, e tem orientação geral NE-SW (Almeida *et al.*, 2000c).

Na área de Montouro, as zonas de maior altitude constituem uma superfície aplanada, caracterizada pela presença de níveis de depósitos de praias antigas. A transição para níveis inferiores processa-se através de declive pouco acentuado. É nesse nível inferior que emerge a água da nascente de Montouro. Na região são visíveis movimentos tectónicos responsáveis pela geomorfologia do Quaternário e pela existência de estruturas diversas, como é o caso do anticlinal de Montouro-Mesas.

A zona envolvente à exurgência de Olhos da Ferverça caracteriza-se por apresentar baixas altitudes, que evoluem gradualmente para maiores altitudes a sul representadas pela plataforma Plio-Plistocénica de Gordos-Meco (Barbosa *et al.*, 1988), e pelo extenso planalto do Jurássico de Cantanhede-Ançã (Barbosa *et al.*, 1988). A morfologia apresenta pequenos relevos ondulados e superfícies aplanadas de baixa altitude patentes essencialmente na zona

oeste onde predominam materiais dunares, que incluem as Areias da Gândara (Soares de Carvalho, 1952; 1954). A topografia desta fração da Orla Mesocenozóica Ocidental desenvolveu-se a partir de superfícies construídas pelo mar, nos finais do Pliocénico ou já no Quaternário, subsistindo retalhos a culminarem elevações, de que são exemplo as plataformas de Santa Luzia-Barcouço, de Murtede-Cantanhede, de Gordos-Meco (Almeida, 1997). Também Ribeiro (2013) evidencia a aplanação que ocorre na transição Pliocénico-Quaternário com taxas de levantamento diferenciadas e conseqüente formação de terraços marinhos e fluviais, que denunciam o encaixe da rede fluvial atual.

2.3 - Enquadramento climatológico

A região, na qual se inserem as áreas em estudo, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger (Essenwanger, 2001), tem um clima temperado com verão seco e temperado, designado de Csb (IM & AEMet, 2011). Na Figura 2.8 é possível visualizar a representação da área em estudo e a correspondente classificação climática. O clima Csb caracteriza-se por ter a temperatura média do mês mais frio compreendida entre 0 e 18 °C, a temperatura média do mês mais quente menor ou igual a 22 °C e com quatro meses, ou mais, com temperatura média superior a 10 °C. A Figura 2.9 tem a representação gráfica dos valores de temperatura média mensal da estação climatológica de Coimbra/Bencanta, da rede do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), onde se pode confirmar que se enquadram nos intervalos descritos. Esta estação foi escolhida por ser a de maior proximidade no conjunto das duas áreas de estudo e da qual se tem acesso aos dados.

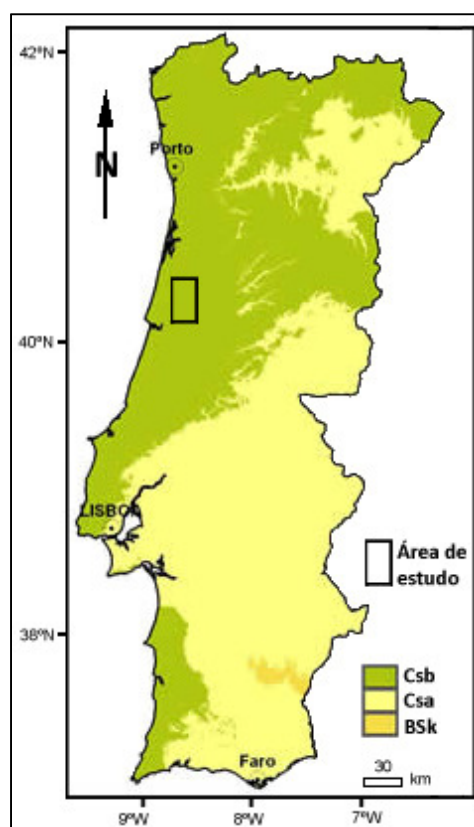


Figura 2.8 - Classificação climática de Köppen-Geiger (Csb) na região em estudo (adaptado de IPMA, 2013).

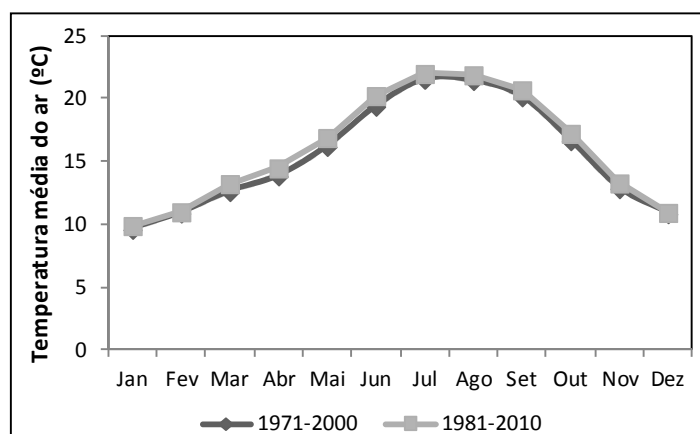


Figura 2.9 - Temperatura média do ar (°C) na estação climatológica de Coimbra/Bencanta (dados disponíveis em IPMA, 2013).

Os dados pluviométricos para os mesmos períodos de tempo e para a mesma estação climatológica de Coimbra/Bencanta estão representados na Figura 2.10. É possível constatar que os meses de menor precipitação são julho e agosto, aos quais correspondem as temperaturas médias mais elevadas, seguidos de junho e setembro, afirmando-se como o período mais seco do ano hidrológico. A precipitação média anual tem um valor próximo de 900 mm/ano, sendo cerca de 80 % relativa ao período compreendido entre outubro e abril, evidenciando a sazonalidade da distribuição da precipitação ao longo do ano.

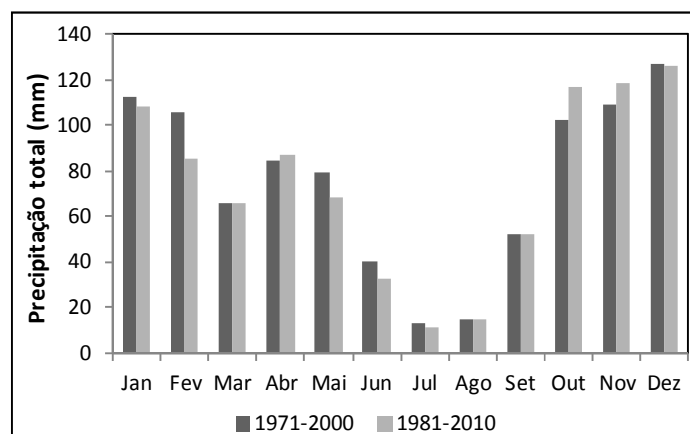


Figura 2.10 - Média da precipitação atmosférica total (mm) na estação climatológica de Coimbra/Bencanta (dados disponíveis em IPMA, 2013).

Na base de dados do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) também está disponível informação das estações meteorológicas geridas por esta entidade. A Tabela 2.1 tem um resumo dos parâmetros das estações de Coimbra, Cantanhede, Estrada, Ferreira-a-Nova, Tentúgal e Santo Varão, que são as mais próximas das áreas em estudo. O período de dados indicado corresponde àquele para os quais são disponibilizados dados para cada estação udométrica/udográfica ou climatológica. No entanto, há meses em falta e após

outubro de 2001 alguns dos dados resultam de um valor calculado (vc), pois falta valor introduzido, como referido na própria base de dados.

Tabela 2.1 - Estações meteorológicas utilizadas da base de dados do SNIRH (2014b).

Código	Nome	Tipo de estação	Altitude (m)	Latitude (°N)	Longitude (°W)	Período dos dados
12G/02UG	Coimbra	Udométrica/Udográfica	27	40.216	-8.437	Mai-80 a Jun-08
11F/01UG	Cantanhede	Udométrica/Udográfica	58	40.356	-8.593	Ago-80 a Dez-10
11F/02UG	Estrada	Udométrica/Udográfica	45	40.465	-8.642	Ago-80 a Fev-09
12E/02UG	Ferreira-a-Nova	Udométrica/Udográfica	18	40.235	-8.748	Jul-79 a Fev-09
12F/01UG	Tentúgal	Udométrica/Udográfica	72	40.241	-8.593	Dez-53 a Set-12
12F/02C	Santo Varão	Climatológica	15	40.184	-8.602	Abr-63 a Abr-09

A estação climatológica de Santo Varão possui uma série considerável de dados, mas o parâmetro temperatura não apresenta dados entre setembro de 1992 e junho de 2003. A comparação das temperaturas entre esta estação e a de Coimbra/Bencanta (Figura 2.11) denota grandes semelhanças com valores da mesma ordem de grandeza, apesar do intervalo de dados ligeiramente diferente. Optou-se por considerar válida a utilização dos dados da estação de Coimbra/Bencanta para caracterizar a temperatura média do ar nas áreas de estudo.

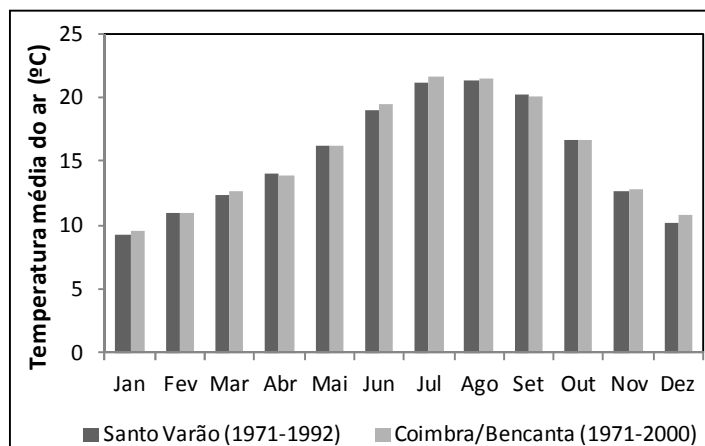


Figura 2.11 - Temperatura média do ar (°C) nas estações climatológicas de Santo Varão e Coimbra/Bencanta (dados disponíveis em IPMA, 2013; SNIRH, 2014b).

Na Figura 2.12 apresenta-se a distribuição da precipitação ao longo do ano para as cinco estações no intervalo de tempo compreendido entre janeiro de 1981 e dezembro de 1998, período para o qual os dados registados são comuns a todas as estações. A estação de Tentúgal é a que tem maiores registos de precipitação, no entanto, todas as estações evidenciam a mesma tendência de evolução da precipitação ao longo do ano, sendo também visível a respetiva sazonalidade, com predomínio da pluviosidade nos meses de outubro a abril

com 80 ± 1 % da precipitação total anual. Apesar do diferente intervalo de tempo, a análise conjunta da Figura 2.10 e da Figura 2.12 expressa grandes semelhanças de comportamento.

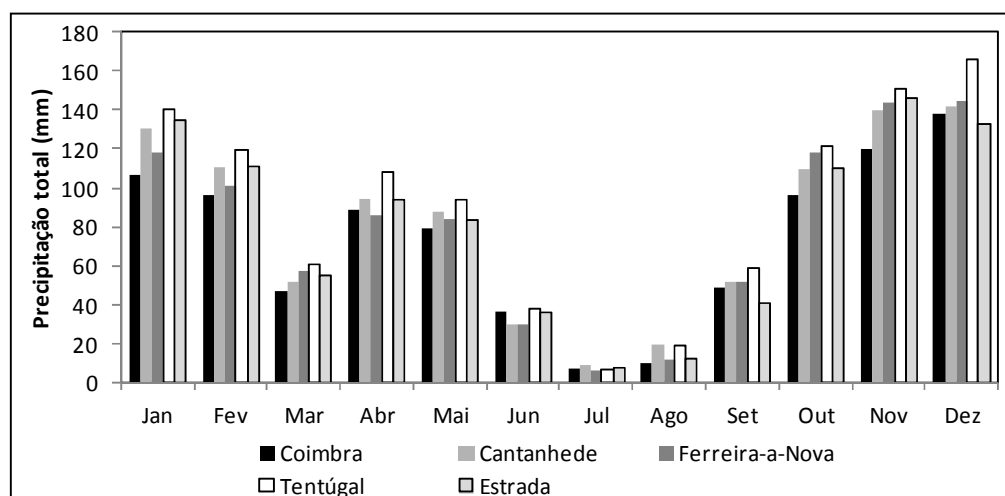


Figura 2.12 - Média da precipitação atmosférica total (mm) nas estações de Coimbra, Tentúgal, Cantanhede, Estrada e Ferreira-a-Nova no período de jan. de 1981 a dez. de 1998 (dados disponíveis em SNIRH, 2014b).

Na Tabela 2.2 está sintetizado o valor médio da precipitação total anual para cada uma das estações em análise no respetivo intervalo de tempo. Como se pode constatar, no período de 1981/98 a estação de Coimbra apresenta menor precipitação anual, com cerca de 81 % da precipitação relativamente a Tentúgal e 90 a 92 % para as restantes estações. Comparando os dados destas estações com a de Coimbra/Bencanta, com um intervalo de tempo díspar, regista-se a mesma tendência identificada entre estações do SNIRH, podendo a diferença entre Coimbra (12G/02UG) e Coimbra/Bencanta (09-09UTC) ser explicada pelo maior número de anos (30) desta última estação, que atenua os valores extremos que possivelmente se tenham registado, e que são mais notórios num mais curto intervalo de tempo (18 anos).

Tabela 2.2 - Médias da precipitação atmosférica total anual (mm) nas estações meteorológicas do SNIRH (2014b) e do IPMA (2013).

Rede	Código	Nome	Intervalo de dados	Anual (mm)
SNIRH	12G/02UG	Coimbra	1981-1998	876.5
	11F/01UG	Cantanhede		976.1
	11F/02UG	Estrada		963.1
	12E/02UG	Ferreira-a-Nova		953.1
	12F/01UG	Tentúgal		1083.4
IPMA	09-09UTC	Coimbra/Bencanta	1971-2000	905.1
	09-09UTC	Coimbra/Bencanta	1981-2010	886.0

Com o intuito de avaliar se os dados da estação de Coimbra/Bencanta podem ser utilizados para caracterizar as áreas em estudo nos anos em que decorreu o trabalho de campo, e uma

vez que a base de dados do SNIRH deixou de ser atualizada e os seus dados não são totalmente fiáveis (SNIRH, 2014b), fez-se a quantificação da precipitação nas áreas, no período 1981/98, através da execução dos polígonos de Thiessen (Figura 2.13 e Figura 2.14).

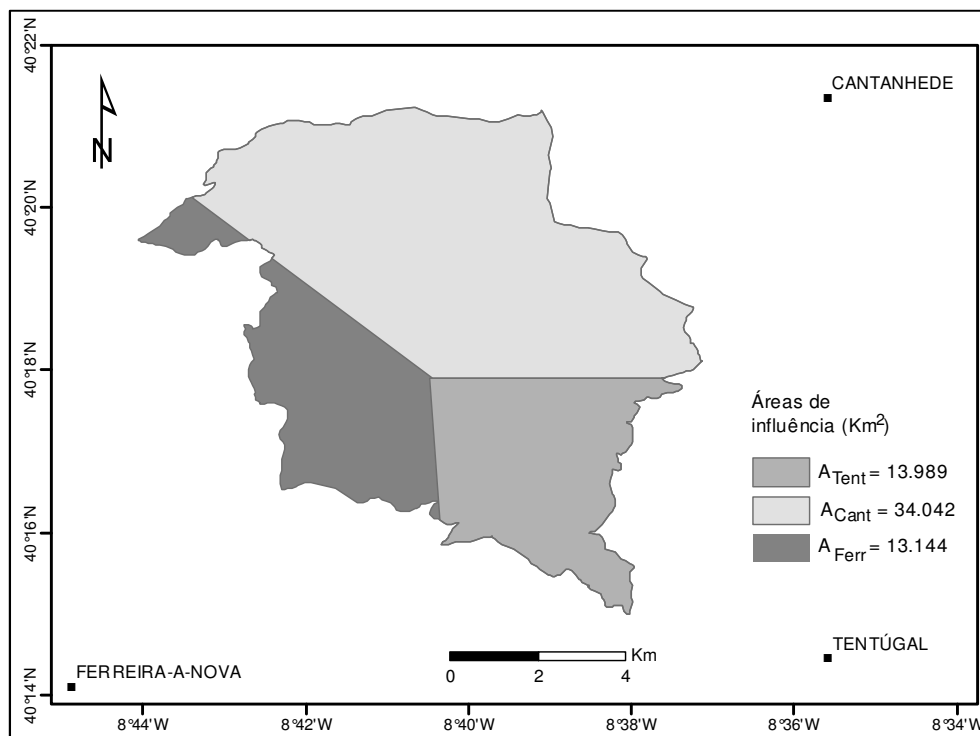


Figura 2.13 - Polígonos de Thiessen na bacia hidrográfica de Ferveça.

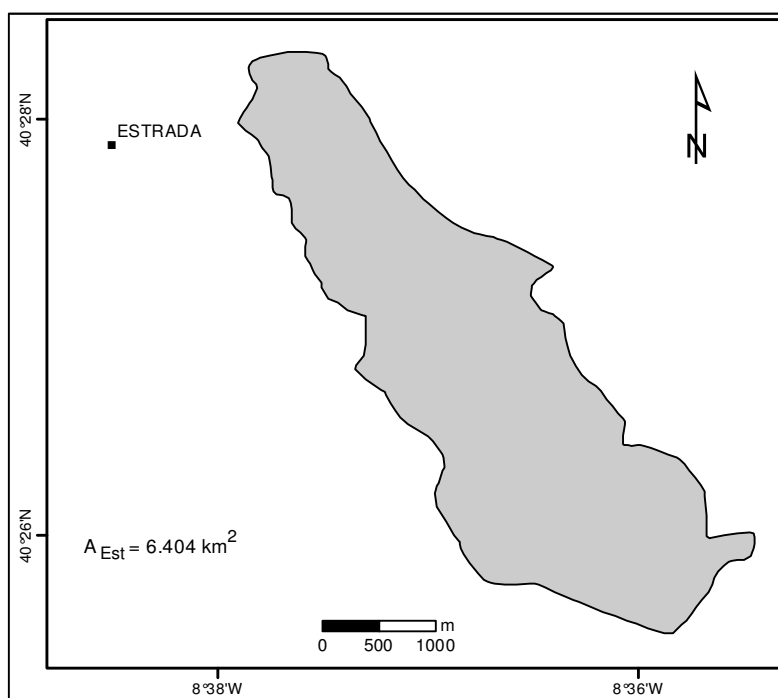


Figura 2.14 - Polígono de Thiessen na microbacia hidrográfica de Montouro.

A precipitação anual ponderada nas bacias hidrográficas (P_{BH} , em mm) é determinada com base na equação [2.1], onde P_i (mm) representa a precipitação anual em cada estação, A_i (km^2) a área de influência de cada estação e A (km^2) a área total da bacia hidrográfica.

$$P_{BH} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i A_i)}{A} \quad [2.1]$$

A Tabela 2.3 resume os resultados obtidos para ambas as bacias hidrográficas, verificando-se que as estações de Cantanhede, Ferreira-a-Nova e Tentúgal influenciam a BhF e a estação Estrada, devido à proximidade da MhM, exerce influência na totalidade desta área.

Comparando estes resultados com os registados na estação de Coimbra (876.5 mm) no período de 1981/98, constata-se que a precipitação ponderada para cada bacia hidrográfica é ligeiramente superior, correspondendo o valor de Coimbra a 88 % do valor da precipitação ponderada na BhF e a 91 % no caso da MhM. Tendo em conta a falta de dados para os anos das campanhas de amostragem no SNIRH, e a inexistência de estações da rede do IPMA com influência nas zonas em estudo, optou-se por considerar os dados da estação de Coimbra do IPMA, representando-se na Figura 2.15 a precipitação total mensal relativa aos anos hidrológicos de 2010/11 e 2011/12.

Tabela 2.3 - Precipitação anual ponderada nas áreas de estudo, no período 1981/98.

Bacia hidrográfica	Estação	A_i (km^2)	P_i (mm)	P_{BH} (mm)
BhF	Cantanhede	34.042	976.1	995.7
	Ferreira-a-Nova	13.144	953.1	
	Tentúgal	13.989	1083.4	
MhM	Estrada	6.404	963.1	963.1

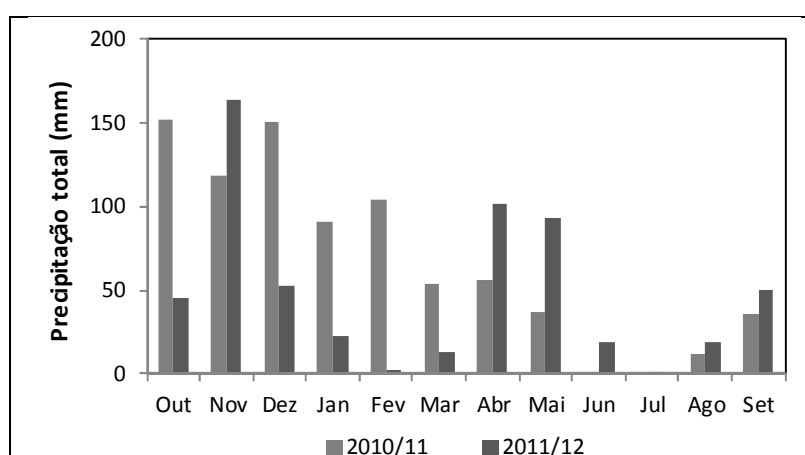


Figura 2.15 - Precipitação atmosférica total mensal na estação de Coimbra (dados disponíveis em IM, 2010a; 2010b; 2010c; 2011a; 2011b; 2011c; 2011d; 2011e; 2011f; 2011g; 2011h; 2011i; 2011j; 2011k; 2011l; 2012a; 2012b; 2012c; 2012d; 2012e; 2012f; 2012g; 2012h; 2012i; 2012j).

A cada valor mensal de precipitação da estação de Coimbra foi aplicado o fator de conversão correspondente a cada bacia hidrográfica. A Tabela 2.4 tem a síntese dos resultados da precipitação anual ponderada nos anos hidrológicos 2010/11 e 2011/12 e a Figura 2.16 a representação da distribuição mensal da precipitação na bacia hidrográfica de Fervença (a) e na microbacia hidrográfica de Montouro (b).

Como se pode verificar, o ano hidrológico 2011/12 apresentou uma redução significativa da precipitação, em que apesar de o mês de novembro ter registado um total mensal superior ao normal (IM, 2012a), os meses de outubro, dezembro e janeiro a março tiveram precipitações muito inferiores ao normal, o que contribuiu para condições atípicas no período de inverno.

Tabela 2.4 - Precipitação atmosférica total anual (mm) estimada para as áreas de estudo.

Ano Hidrológico	Coimbra	BhF	MhM
2010/2011	813.1	924.0	893.5
2011/2012	583.6	663.2	641.3

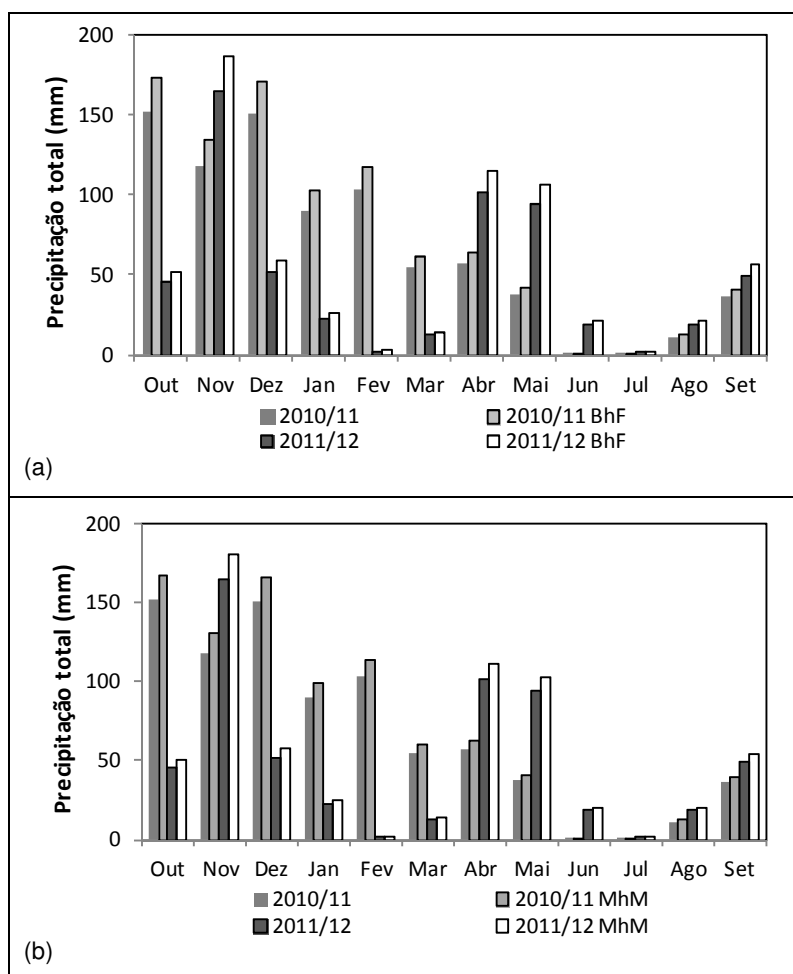


Figura 2.16 - Precipitação atmosférica total mensal na estação de Coimbra, na BhF (a) e na MhM (b) nos anos hidrológicos 2010/11 e 2011/12.

2.4 - Enquadramento hidrográfico

A rede de drenagem de ambas as zonas de estudo está incluída na bacia hidrográfica do rio Vouga (Figura 2.17) e as águas superficiais confluem para a ria de Aveiro, troço terminal do rio correspondente à zona lagunar. A bacia hidrográfica do rio Vouga tem uma orientação dominante E-W, identificando-se na parte oeste afluentes como o Braço da Gafanha, que inclui o rio Boco, e o Braço sul da ria de Aveiro, que inclui a ribeira da Corujeira (Costa *et al.*, 2001).

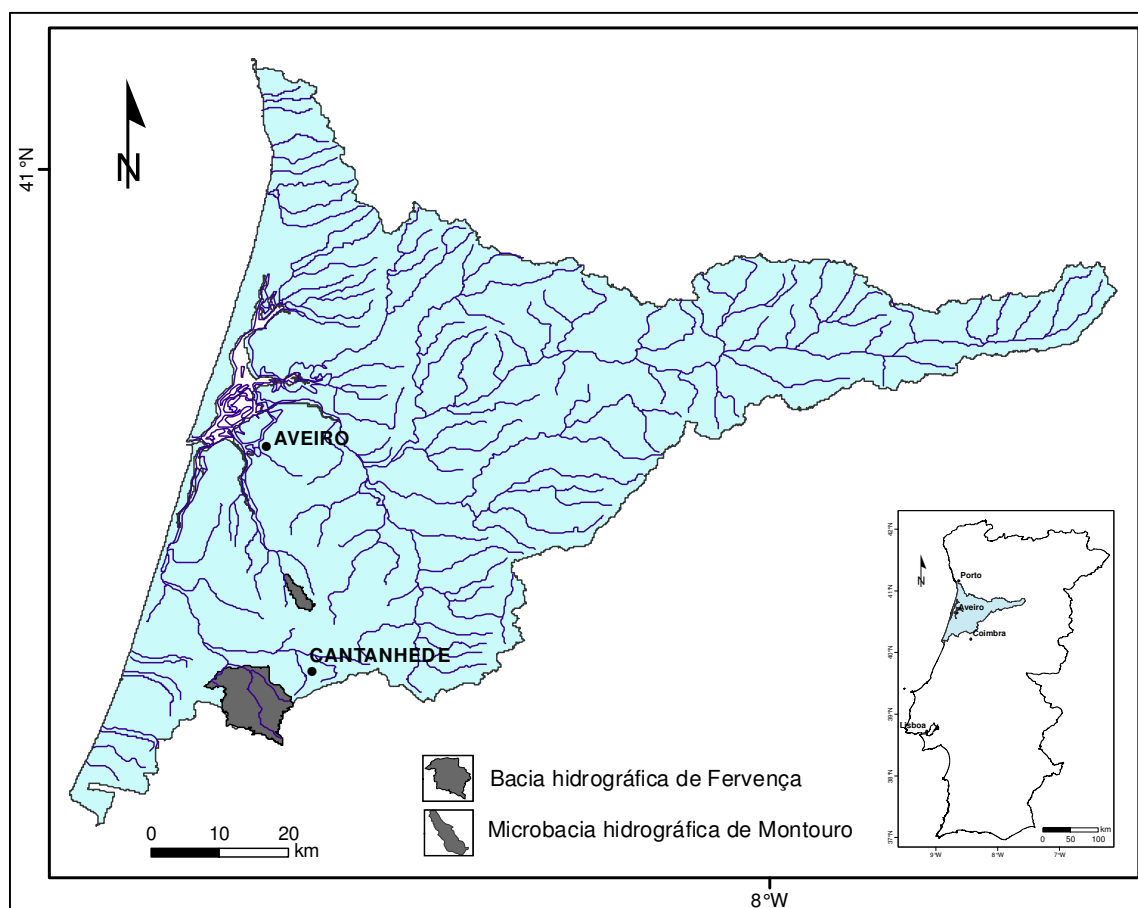


Figura 2.17 - Bacia hidrográfica do rio Vouga, com a localização das bacias hidrográficas estudadas (adaptado de SNIRH, 2014a).

Na microbacia hidrográfica de Montouro, a rede de drenagem recorta os depósitos de praias antigas permitindo o afloramento do substrato cretácico. Esta rede de drenagem revela-se concordante com a fracturação regional, com vales a denotar uma direção de escoamento ESE para WNW (Figura 2.18). A linha de água principal, afluente do ribeiro de Mesas, conflui para o rio Boco, que por sua vez desagua na ria de Aveiro, através do canal de Ílhavo (Coelho *et al.*, 2012). O encaixe e declive dos vales são relativamente pouco acentuados, proporcionando um escoamento lento das águas, com frequentes zonas de retenção (Barbosa, 1981a). A Figura 2.19 evidencia este facto em dois locais distintos, um a montante e outro a jusante da nascente. O comprimento total das linhas de água é de 23.31 km, sendo 4.83 km relativos à linha de água principal, que é uma linha de água intermitente.

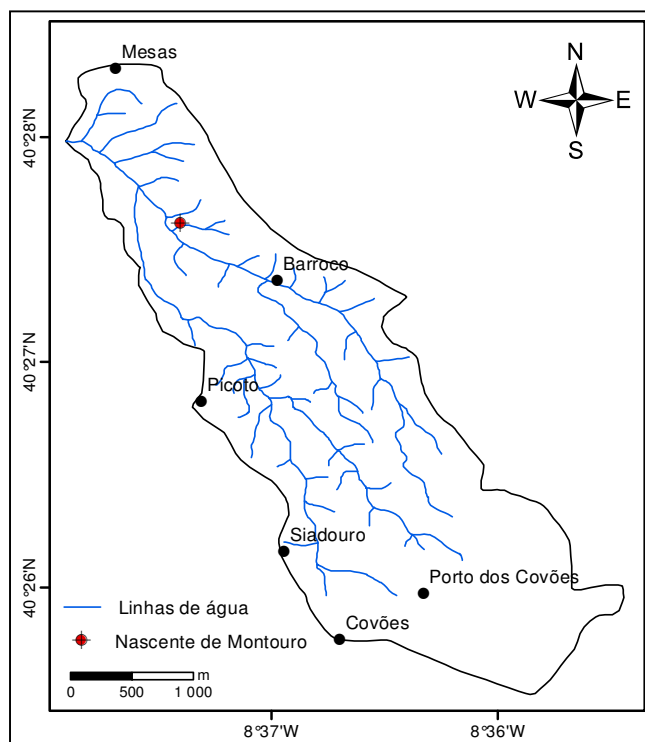


Figura 2.18 - Microbacia hidrográfica de Montouro e respetiva rede de drenagem (adaptado de IGeoE, 2001a).



(a)



(b)

Figura 2.19 - Zonas de vale a montante (a) e a jusante (b) da nascente de Montouro, com acumulação temporária de água.

No caso da bacia hidrográfica de Ferveça, a linha de água de maior importância é a ribeira ou vala da Corujeira (Figura 2.20), que nasce em Casais Linhaceiros, passa no local das exsurgências, conflui com a ribeira de Varziela e mais a jusante converge para a ria de Aveiro, através do canal de Mira (Coelho *et al.*, 2012). O percurso revela-se fortemente condicionado pelo declive topográfico e pelo vasto manto sedimentar eólico existente em grande parte da região. Na zona com afloramento de rochas carbonatadas, concretamente nas formações margosas, a rede de drenagem é muito pouco incisiva, de tipo subsequente e obsequente, condicionada por alinhamentos aparentemente de fratura, enquanto que nos calcários, as linhas de água são incisivas, de tipo subsequente; nas formações do Cretácico predomina o tipo dendrítico (Barbosa *et al.*, 1988). De salientar a particular irregularidade da drenagem na zona, com a parte sul a apresentar os afluentes maioritariamente na margem direita, enquanto

na margem esquerda, onde a cobertura é de areias de duna, praticamente não há linhas de água.

A ribeira da Corujeira, é uma linha de água perene, com 15.70 km de comprimento e contribui para os 105.86 km de comprimento da totalidade das linhas de água da BhF.

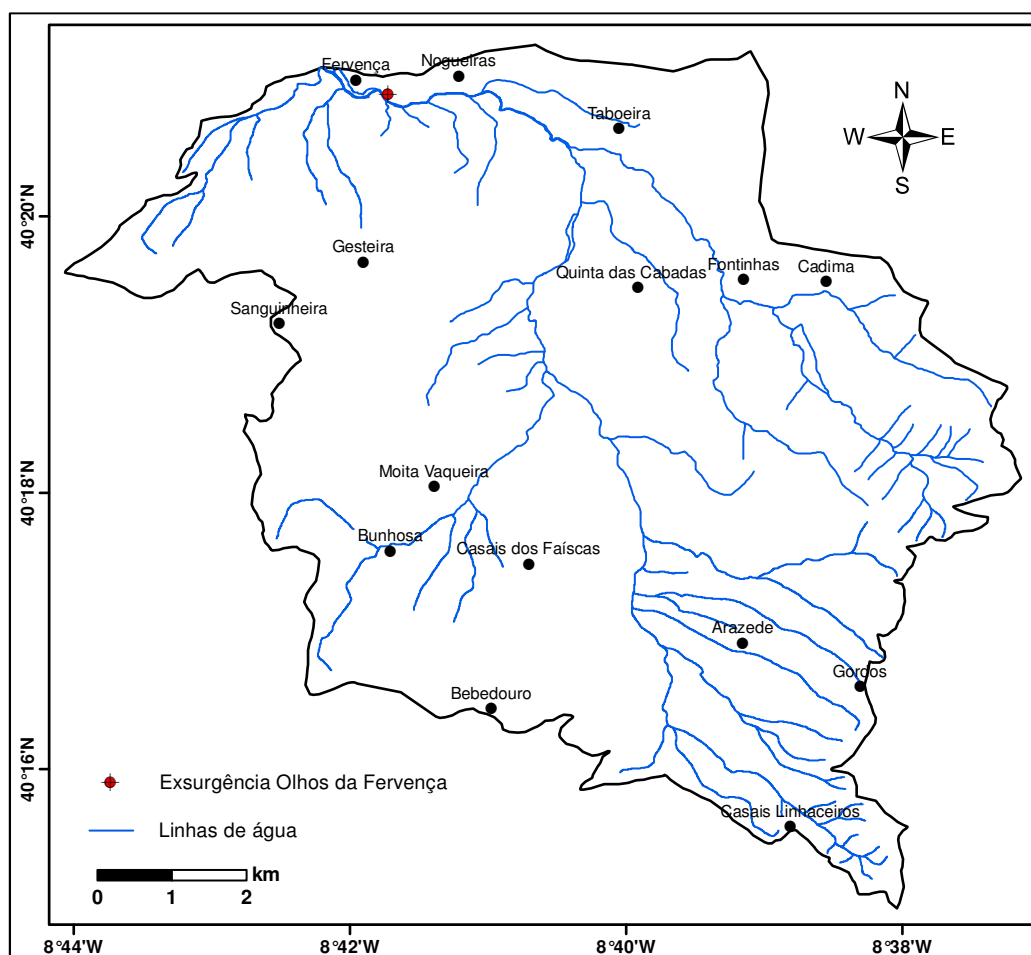


Figura 2.20 - Bacia hidrográfica de Ferveça e respetiva rede de drenagem (adaptado de IGeoE, 2001b; 2001c; 2001d; 2001e).

A Tabela 2.5 sintetiza as características morfométricas das duas bacias hidrográficas. Consta-se que ambas apresentam baixa irregularidade, com valores de coeficiente de compacidade muito próximos (1.57 e 1.56), forma estreita e alongada ($Kf < 0.3$), denotam relevo medianamente acentuado ($Ka \approx 0.3$) e o coeficiente de homogeneidade evidencia maior relação com a forma de um ovoide na MhM devido ao valor mais próximo da unidade. Em ambas as bacias hidrográficas o índice de declividade é semelhante e a densidade de drenagem corresponde a uma drenagem razoável ($1.5 < Dd \leq 5.5$), sendo na de Ferveça inferior à de Montouro.

Tabela 2.5 - Parâmetros morfométricos da microbacia hidrográfica de Montouro e da bacia hidrográfica de Fervença, de acordo com os elementos das Cartas Militares 1/25000.

Parâmetros		MhM	BhF
Área (km ²)	A	6.40	61.18
Perímetro (km)	P	14.19	43.51
Comprimento total das linhas de água (km)	L_t	23.31	105.86
Comprimento da linha de água principal (km)	L	4.83	15.70
Cota elipsoidal máxima (m)	$h_{máx}$	146	198
Cota elipsoidal mínima (m)	$h_{mín}$	74	68
Coefficiente de compactidade	$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	1.57	1.56
Fator forma	$K_f = \frac{A}{L^2}$	0.27	0.25
Coefficiente de alongamento	$K_a = \frac{1}{L} \frac{\sqrt{4A}}{\pi}$	0.33	0.32
Coefficiente de homogeneidade	$K_h = \frac{0.25A}{\sqrt{L/2.59}}$	1.17	6.21
Índice de declividade	$I_d = \frac{h_{máx} - h_{mín}}{L_e}$	0.01	0.01
Densidade de drenagem (km ⁻¹)	$D_d = \frac{L_t}{A}$	3.64	1.73

Comprimento do retângulo equivalente: $L_e = 0,89 K_c \sqrt{A} \left[1 + \sqrt{1 - (1,12/K_c)^2} \right]$

Coelho *et al.* (2012) indicam estimativas do escoamento natural que ocorreria numa situação pristina, sem consumos humanos ou alterações de regime de origem antropogénica para as massas de água de cada bacia hidrográfica em ano médio, seco e húmido.

Na Tabela 2.6 apresentam-se os valores para o rio Boco e a ribeira da Corujeira, sendo notório o maior volume de escoamento na ribeira possivelmente associado ao contributo da exsurgência Olhos da Fervença.

Tabela 2.6 - Escoamento natural anual (m³) em massas de água na bacia hidrográfica do rio Vouga (adaptado de Coelho *et al.*, 2012).

Massa de água		Escoamento anual (m ³)		
Código	Nome	Seco	Médio	Húmido
04VOU0563	rio Boco	1.75E+07	4.20E+07	6.37E+07
04VOU0572	ribeira da Corujeira	3.13E+07	6.70E+07	1.00E+08

2.5 - Enquadramento geológico

A evolução geodinâmica da Ibéria no Meso-Cenozóico é dominada pelos Ciclos de Wilson do Tétis e do Atlântico, os quais explicam a geologia regional da Bacia Ocidental (Lusitaniana) e a evolução morfotectónica e sismotectónica da Ibéria e da margem oeste (Ribeiro, 2013).

As unidades geológicas da Orla Mesocenozóica são o resultado de uma sedimentação diferencial (Ramos, 2000), em depressões individualizadas por sistemas de barreiras controlados pela subsidência e basculamento de blocos ao longo de falhas em geral de tipo lítrico (Reis *et al.*, 1992).

Cunha & Martins (2004) referem a ocorrência de fases sucessivas de *rifting* na bordadura ocidental da Ibéria, durante o Mesozóico, que promoveram a sedimentação numa complexa fossa com alongamento geral meridiano, a Bacia Lusitânica ou Lusitaniana. Por exemplo, no início do Jurássico Inferior, depois de um período de subsidência regional com deposição de evaporitos e carbonatos, ocorreu uma segunda fase de *rifting* com deposição de uma plataforma carbonatada de dolomias marinhas e evaporitos que gradualmente se expandiram para as fronteiras da Bacia Lusitaniana. As Formações de Coimbra, de Vale das Fontes, de Lemedo, de São Gião e de Póvoa da Lomba (Duarte & Soares, 2002) são unidades caracterizadoras deste período deposicional. A discordância regional resultante da lacuna de deposição entre o fim do Jurássico médio e o início do superior estará relacionada com a elevação devido à abertura do Oceano Atlântico central (Rasmussen *et al.*, 1998). Por sua vez, os atuais afloramentos cretácicos são representativos das etapas finais de enchimento e colmatação (Rey *et al.*, 2006).

As condições de deposição no interior da Bacia Lusitânica denotam variabilidade, com as áreas a sul e a oeste a revelarem uma abertura gradual com influência marinha, enquanto a norte e a este ocorreu um enchimento detrítico de origem continental (Condesso de Melo & Marques da Silva, 2008). Estes autores indicam que a sequência estratigráfica da bacia é descontínua e varia em idade desde o Triássico superior ao Holocénico.

Nas áreas em análise destaca-se o facto de os depósitos quaternários terem representação expressiva, o que em algumas situações inviabiliza a observação direta das unidades inferiores. Estes terrenos de recobrimento repousam em estratigrafia discordante sobre os diversos afloramentos jurássicos ou cretácicos (Choffat, 1889).

No trabalho de Carvalho (1964) é referido que as formações mesozóicas da Orla Mesocenozóica Ocidental de Portugal são sobrepostas ou ocultas por formações superficiais, predominantemente detríticas, em geral, não fossilíferas que nas cartas geológicas são englobadas pela designação “Pliocénico”. Rocha (1993) refere que o Pliocénico é marcado por ciclos de regressão-transgressão consecutivos e que estes sedimentos foram erguidos e inclinados por movimentos tectónicos. Durante o Quaternário, são desenvolvidas várias superfícies de erosão e os depósitos de sedimentação são essencialmente de areia grosseira e cascalho, muitas vezes afetadas por movimentos neotectónicos.

Cabral (1995) indica que a aplanagem litoral corresponde a um planalto complexo onde se escalonam, por embutimento nítido, vários níveis de praia e de terraços fluviais atribuídos ao Quaternário.

De forma genérica, pode-se dizer que a Orla exibe grande variabilidade litológica, com abundância de carbonatos, arenitos e argilitos, além de materiais arenosos desagregados na

cobertura quaternária. Os sedimentos acumulados na zona axial da Bacia Lusitaniana atingem cerca de 5 km de espessura (Almeida *et al.*, 2000b).

Na Tabela 2.7 apresenta-se a equivalência entre as unidades litostratigráficas aflorantes nas áreas de estudo e representadas nas cartas geológicas, escala 1/50000, 16-C Vagos (Barbosa, 1981b) e 19-A Cantanhede (Barbosa *et al.*, 1987-88).

Tabela 2.7 - Correlação litostratigráfica entre as unidades das Cartas geológicas 16-C Vagos e 19-A Cantanhede onde estão representadas as áreas em estudo.

Idade	Carta geológica 16-C Vagos	Carta geológica 19-A Cantanhede
Holocénico	a - Aluviões	a - Aluviões
		Ec - Eluviões carbonatados
		Ea - Eluviões areníticos
	dd - Dunas	dd - Dunas
	Ae - Areias eólicas	A - Areias eólicas
		Ae - Areias hidro-eólicas
Plistocénico	Q ² _b - Nível de 45-50 m	Q ² - Areias de Cantanhede
	Q ² _a - Nível de 60-70 m	
	Q ¹ - Nível de 80-90 m	Q ¹ - Areias de Arazede
Pliocénico superior		P - Areias de Cordinhã / Cascalheiras de Gordos
Maastrichtiano	C ⁵ - Argilas de Vagos	C ⁵ - Arenitos e argilas de Viso
Campaniano		
Santoniano		
Coniaciano	C ⁴ - Grés de Picoto-Siadouro	C ⁴ - Grés de Verba
Turoniano	C ³ - Grés de Furadouro	C ³⁻⁴ - Grés de Oiã
Cenomaniano	superior	C ²⁻³ - Calcários de Tentúgal
	médio	
	inferior	C ² - Calcários de Mamarrosa
Albiano	C ¹⁻² - Grés de Palhaça	C ¹⁻² - Arenitos de Carrascal
Aptiano		
Bajociano inferior		J ² ₁ - Calcários margosos de Póvoa da Lomba
Toarciano	superior	J ¹ _g - Margas calcárias de S. Gião
	médio	
	inferior	J ¹ _g - Calcários margosos e margas
Domeriano	superior	J ¹ _f - Calcários e calcários margosos
	médio	J ¹ _e - Margas e calcários margosos
	inferior	
Carixiano		J ¹ _{ef} - Margas e calcários margosos de Vale das Fontes
Lotaringiano	J ¹ _{cd} - Calcários dolomíticos	J ¹ _{cd} - Camadas de Coimbra
Sinemuriano		

2.5.1 - Geologia na microbacia hidrográfica de Montouro

Na MhM os depósitos quaternários localizam-se, maioritariamente, nos domínios mais elevados e recobrem parcialmente as formações de idade cretácica, dificultando o seu afloramento. O Cretácico está representado pelas formações do Grés de Oiã, Grés de Verba, Grés de Picoto-Siadouro e Argilas de Vagos. Os depósitos de praias antigas, pliocénicos, de um modo geral, são arenosos podendo conter seixos rolados e os depósitos modernos presentes são constituídos por aluviões e pertencem ao Holocénico. Na região os depósitos de praias antigas formam grandes plataformas e foram designados de Areias de Esgueira por

Choffat (1900). Também Dinis (2004) refere que a Plataforma de Carqueijo (s. l.) surge suportada por sedimentos designados de Q^1 , Q^2_a e Q^2_b .

A Figura 2.21 apresenta a cartografia da geologia no interior da microbacia hidrográfica, com possibilidade de visualização da geologia regional aflorante, nomeadamente as formações cretácicas, a NE, Grés de Furadouro (C^3), Calcários de Mamarrosa (C^2) e Grés de Palhaça (C^{1-2}) e as formações jurássicas Calcários e calcários margosos (J^1_f) a SW, Margas e calcários margosos (J^1_e) a SE, e Calcários dolomíticos (J^1_{cd}) a SW. A oeste estão presentes Dunas (dd) e Areias eólicas (Ae).

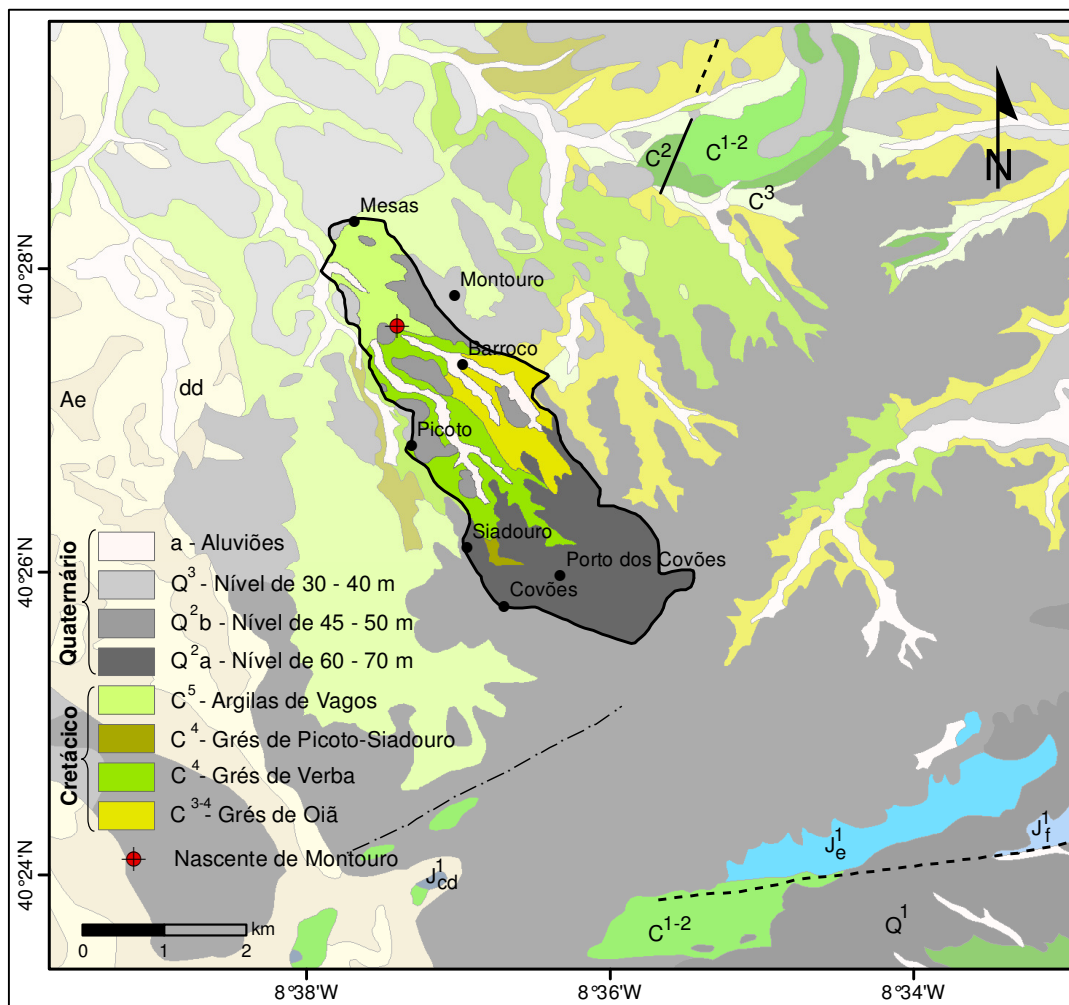


Figura 2.21 - Mapa geológico da área de estudo em Montouro (adaptado de Barbosa, 1981b).

2.5.1.1 - Cretácico

A unidade Grés de Oiã (C^{3-4}) apresenta uma espessura média da ordem dos 40 m e será turoniana a coniaciana (Barbosa, 1981a). Corresponde aos Grés rosa e argilas com seixos rolados de Choffat (1900) e aos Grés e areias cenoturonianas de Oiã identificados por Carrington da Costa (1937). Na base, ocorrem grés finos argilosos e argilas laminadas micáceas, que evoluem para grés grosseiro, mal calibrado, arcósico a subarcósico em alguns locais e noutros quartzo-argiloso, com lentículas de seixos e/ou cascalheiras. Têm cor

amarelada ou acinzentada com manchas avermelhadas e vinosas (Figura 2.22 (a)). No topo as manchas avermelhadas desaparecem e o grés é mais bem calibrado. A estratificação deixa de ser detetada ao contrário do que acontecia no nível intermédio onde a estrutura é entrecruzada curvilínea e/ou planar com ângulo médio a elevado. Em Barbosa (1981a) é feita uma descrição desta formação na área em estudo, que indica que os grés são grosseiros a muito grosseiros, com lentículas de argila, seixos rolados e/ou cascalheiras, de cor amarela-acinzentada, com manchas vermelho-vinosas. Nas proximidades do contacto com o Grés de Verba o grés apresenta-se subarcósico e/ou arcósico, de cor acinzentada-esverdeada, deixando de serem visíveis tanto as manchas vermelhas-vinosas como as cascalheiras, sendo medianamente a bem calibrado. Na zona de contacto não se identifica nenhuma estrutura, contrariamente aos outros locais onde as estruturas são entrecruzadas de ângulo médio a forte.

O Grés de Verba (C⁴), do Coniaciano – Santoniano, corresponde ao Grés esverdeado com pontos vermelhos identificado por Choffat (1900). Genericamente, é um depósito detrítico grosseiro a muito grosseiro, calibrado, na base arcósico passando a quartzo-argiloso no topo. Tem cor esbranquiçada ou acinzentada, com manchas avermelhadas ou rosadas na base. Próximo das Argilas de Vagos passa a grés muito fino, silto-argiloso, adquirindo cor acinzentada-esverdeada. A unidade tem um desenvolvimento tabular, com espessura média calculada em 40 ± 10 m (Barbosa, 1981a), sendo que na zona em estudo, entre Barroco e Picoto observa-se cerca de 7 m de grés grosseiro esbranquiçado, levemente amarelado, com grãos de quartzo hialinos e róseos sobrepostos ao Grés de Oiã, que próximo de Picoto passam a grés muito finos silto-argilosos cinzentos. Em Picoto-Siadouro diferencia-se do Grés de Verba um grés de cimento carbonatado designado de Grés de Picoto-Siadouro (C⁴), com espessura máxima de cerca de 5 m. Apresenta-se sob a forma de uma faixa estreita, com uma pequena ocorrência na área estudada, e pertence ao Coniaciano. É um depósito detrítico grosseiro, carbonatado, de cor acinzentada ou amarelo-acastanhada com presença de grãos de quartzo angulosos.

As Argilas de Vagos (C⁵) ocorrem na zona norte da MhM e correspondem aos Arenitos e Argilas de Aveiro referidos por Teixeira & Zbyszewski (1976) ou às Camadas *b*) a *e*) das Assentadas Flúvio-Marinhas de Choffat (1900). A unidade apresenta camadas de argilas esverdeadas e avermelhadas, entre as quais se intercalam camadas gresosas amareladas ou cinzentas-claras e/ou finas camadas de calcários dolomíticos. A espessura da formação é de 150 ± 50 m e idade Santoniano (?) – Maestrichtiano (Barbosa, 1981a). Na Figura 2.22 (b) é possível visualizar um afloramento desta unidade nas imediações da nascente de Montouro.



(a)



(b)

Figura 2.22 - Afloramento das unidades Grés de Oiã (a) e Argilas de Vagos (b) na MhM.

2.5.1.2 - Quaternário

O Nível de 60 - 70 m (Q^2_a) é um depósito com forte representação na zona sul da área em estudo. É constituído por areias e areões com alguns seixos rolados. Corresponde às Areias de Vale do Grou-Areias e Conglomerados de Carqueijo estudadas por Dinis (2004).

Na MhM, a espessura do Nível de 45 - 50 m (Q^2_b) é bastante fina, por vezes inferior a 1 m (Barbosa, 1981a). Caracteriza-se pela presença de sedimentos siliciclásticos como areias e areões com seixos bem rolados. À semelhança do nível anterior também tem equivalência com as Areias de Vale do Grou-Areias e Conglomerados de Carqueijo (Dinis, 2004).

Quanto ao Nível de 30 - 40 m (Q^3), ele ocorre bastante recortado, distribuindo-se por diferentes locais. Compreende areias finas a muito finas, muito bem calibradas, por vezes levemente feldspáticas (Barbosa, 1981a).

Os aluviões (a) têm presença nas linhas de água e são constituídos por materiais finos, areias e areões com pouco seixo, que pontualmente se apresentam lodosos.

2.5.2 - Geologia na bacia hidrográfica de Fervença

Na Figura 2.23 está a representação da geologia aflorante na bacia hidrográfica enquadrante da exurgência de Olhos da Fervença. Existe grande variedade de rochas e depósitos sedimentares, destacando-se as unidades do Jurássico, localizadas essencialmente a E, pequenos afloramentos dispersos do Cretácico e uma faixa de arenitos pliocénicos, que passam a areias quaternárias para oeste constituindo a maior representatividade na área.

Nas unidades jurássicas aflorantes existe predomínio do Liásico comparativamente ao Dogger. A coluna sedimentar cretácica, com cerca de 300 m de espessura, é na maioria correspondente a grés argilosos e/ou quartzosos e pelitos e apenas uma pequena parte dos sedimentos são carbonatados.

O Plio-Quaternário manifesta-se por extensos depósitos de origem praial, fluvial, eólica, ou em menor expressão, torrencial, em regra colmatando plataformas por vezes relativamente extensas (Almeida, 1997). É o caso da Plataforma de Murtede-Cordinhã (Soares de Carvalho, 1952; 1964) ou da Plataforma Gordos-Meco (Barbosa *et al.*, 1988) ou da Plataforma de Cantanhede-Mira (Soares de Carvalho, 1952; 1964).

No mapa geológico de Cantanhede (Barbosa *et al.*, 1988) a Plataforma de Carqueijo (s. I.) é suportada pelas Areias de Cordinhã, Cascalheiras de Gordos e Areias de Arazede (Dinis, 2004).

O manto eólico do Plistocénico e/ou Holocénico engloba, de um modo geral, areias eólicas e dunares, que no caso da área em estudo estão evidenciadas através das Areias hidro-eólicas, Dunas, Eluviões areníticos e carbonatados e Aluviões. O conjunto das Areias hidro-eólicas (Ae) e das Dunas (dd) constituem as denominadas Areias da Gândara (s.s.), de origem eólica, referidas por Carvalho (1964) e que invadiram parcialmente as plataformas previamente formadas.

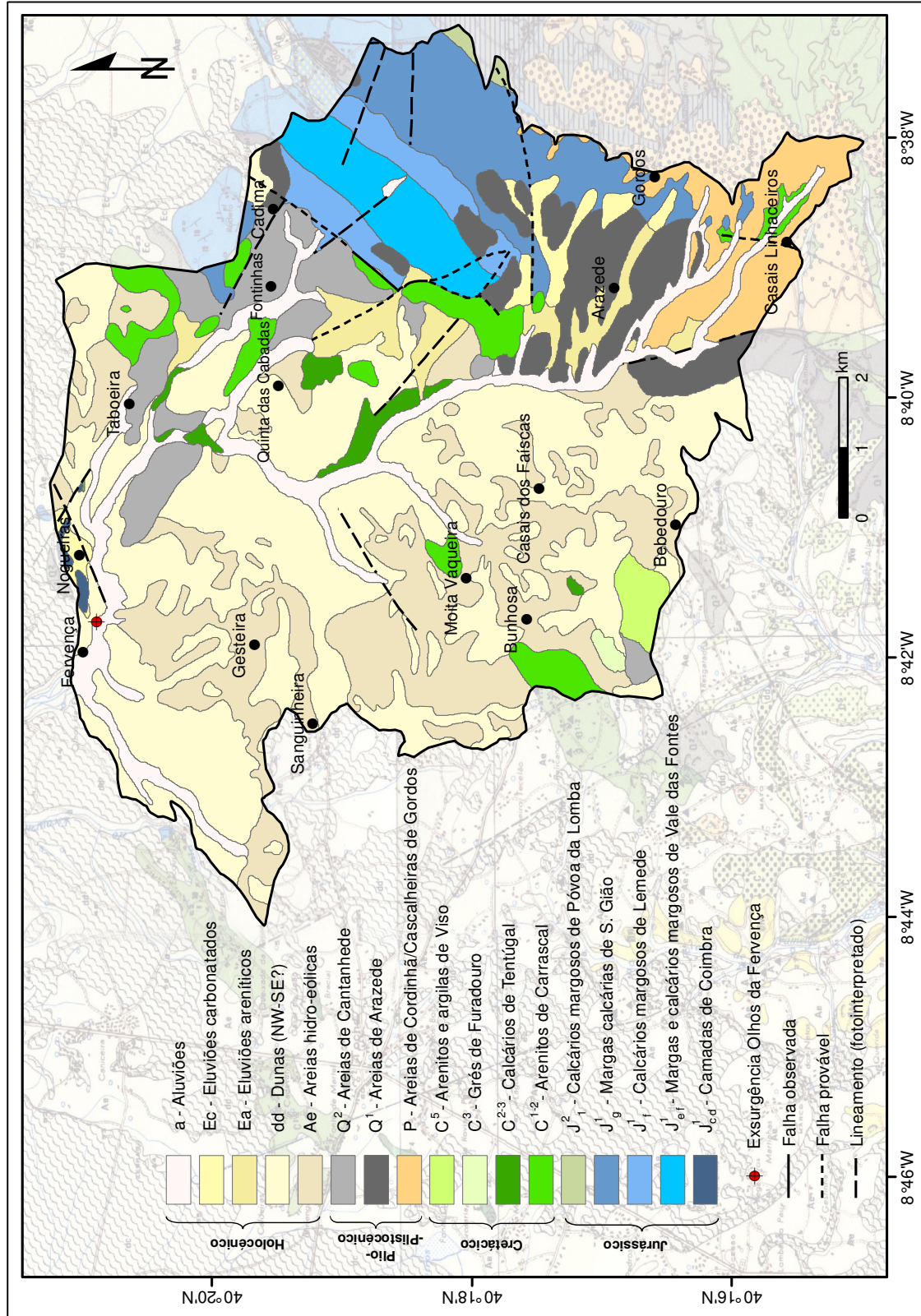


Figura 2.23 - Mapa geológico da área de estudo em Ferveça (adaptado de Barbosa et al., 1987-88).

2.5.2.1 - Jurássico

O afloramento da unidade Camadas de Coimbra (J^{1cd}) é muito limitado, ocorrendo nas proximidades do marco geodésico de Nogueiras, a NE da exurgência e provavelmente por condicionamento estrutural das falhas aí existentes. São calcários dolomitizados, que podem atingir espessuras de cerca de 110 m e pertencem ao Sinemuriano – Lotaringiano (Barbosa *et al.*, 1988). Constituem a mais antiga representação jurássica da bacia hidrográfica.

A unidade Margas e calcários margosos de Vale das Fontes (J^{1ef}) ocorre no núcleo do anticlinal de Cantanhede e é caracterizada por alternância de margas e calcários margosos com desenvolvimento local quer de bancadas de calcário compacto pouco espesso, quer de margas xistosas ou grumosas (Barbosa *et al.*, 1988). A espessura da unidade varia entre 70 e 75 m, a datação indica Carixiano – Domeriano inferior e é equivalente, em conjunto com os Calcários margosos de Lemedede, da parte inferior dos Calcários e margas de Quiaios (Soares *et al.*, 1993).

Os Calcários margosos de Lemedede (J^{1f}) estão presentes nos flancos do anticlinal de Cantanhede, ladeando a unidade anterior. São constituídos por calcários argilosos muito compactos cinzento-amarelados ou esbranquiçados, em bancos mais ou menos espessos que alternam com finos leitos de margas. As espessuras podem chegar aos 50 m e a unidade pertence ao Domeriano médio – superior (Barbosa *et al.*, 1988).

As Margas calcárias de S. Gião (J^{1g}) correspondem a uma das unidades mais espessas com cerca de 300 m, de idade Toarciano. Tem representação no flanco sul e norte do anticlinal de Cantanhede, parcialmente recoberto pelas Areias de Arazede e Areias de Cantanhede, respetivamente, em cada flanco. É constituída por margas, calcários margosos, calcários sublitográficos compactos, calcários margosos nodulosos compactos com níveis margosos, bem como calcários nodulosos e margosos alternantes com margas cinzentas e margas com intercalações de bancadas finas de calcário margoso (da base para o topo). Conjuntamente com a base dos Calcários margosos de Póvoa da Lomba equivale à parte superior dos Calcários e margas de Quiaios (Soares *et al.*, 1993).

Os Calcários margosos de Póvoa da Lomba (J^{2_1}), do Toarciano superior – Bajociano inferior, têm pouca representatividade na área em estudo, aflorando somente no lado E, no bordo sul do anticlinal de Cantanhede. Caracterizam-se pela presença de calcários margosos, mais ou menos compactos, bem como de margas, que exibem maior espessura. No geral, a unidade evidencia uma espessura entre 80 a 120 m, denotando-se aumento progressivo da espessura das camadas calcárias para o topo, comparativamente às margas.

2.5.2.2 - Cretácico

Os Arenitos de Carrascal (C^{1-2}) são a primeira unidade representativa do Cretácico (Aptiano – Cenomaniano médio, segundo Rocha *et al.* (1981)), assentam de forma discordante sobre as unidades anteriores e surgem dispersos por vários locais em pequenos afloramentos. São quartzarenitos a arcossarenitos grosseiros a muito grosseiros, apresentam cascalheiras e seixos quartzosos mal calibrados, aos quais podem suceder leitos pelíticos. Normalmente, têm cor esbranquiçada ou acinzentada com manchas vermelhas, amarelas ou violeta e evidenciam estruturas entrecruzadas, geralmente curvilíneas (Barbosa *et al.*, 1988). A espessura é variável entre 50 e 150 m. Os Arenitos do Carrascal correspondem ao Grés Grosseiro Inferior de

Soares (1966), ou Formação de Figueira da Foz (Dinis, 1999; 2001a), ou Grés Belasianos de Choffat (Choffat, 1897a; 1900).

Os Calcários de Tentúgal (C²⁻³), do Cenomaniano médio – Turoniano inferior, têm presença reduzida na área em estudo, com pequenos afloramentos, maioritariamente localizados próximo de linhas de água. São constituídos por calcários, calcários margosos, grés calcários e margas, com textura concrecionada ou apinhoadas (Choffat, 1897b) e espessuras da ordem dos 10 a 40 m. Esta unidade é equivalente aos Calcários apinhoados de Costa de Arnes (Rocha *et al.*, 1981).

A unidade Grés de Furadouro (C³) é visível unicamente num pequeno afloramento no canto esquerdo da bacia hidrográfica, a espessura pode atingir 20 m, com valores mínimos de 10 m e pertence ao Cenomaniano superior – Turoniano (Barbosa *et al.*, 1988). Inferiormente são quartzareníticos, micáceos finos a muito finos, amarelo-acastanhados, sendo visível estratificação laminítica e/ou oblíqua planar de pequeno ângulo, tendo equivalência com o Grés micáceo fino a muito fino identificado por Soares (1966). No entanto, superiormente a unidade revela-se como subarcosarenítica a arcosarenítica, grosseira a muito grosseira, amarelo-torrada, com seixo pequeno de quartzo, sub-rolado a subanguloso, e com estratificação entrecruzada curvilínea a oblíqua planar, de ângulo médio a elevado.

Os Arenitos e argilas de Viso (C⁵) recobrem as unidades anteriores por discordância angular ou por falha (Barbosa *et al.*, 1988) e podem ter 110 a 150 m de espessura. Choffat (1900) e Soares *et al.* (1982) dataram estes materiais como sendo do Campaniano – Maastrichtiano. Aparecem nas proximidades da formação Grés de Furadouro, estando cobertos pelo manto eólico. É uma unidade de fácies, ora predominantemente pelítica, ora predominantemente arenítica. A fácies pelítica distingue-se pelo tom vermelho vivo e estrutura maciça, por vezes, argilo-margosa, com concreções carbonatadas soltas e/ou fina camada carbonatada fossilífera. A fácies arenítica é fina e bem calibrada semelhante, e confundível, com as areias eólicas.

2.5.2.3 - Quaternário

As Areias de Cordinhã/Cascalheiras de Gordos (P) localizam-se na parte sul da bacia hidrográfica, evidenciando sobreposição das cascalheiras relativamente às areias; as espessuras são da ordem dos 10 a 20 m e incluem-se no Pliocénico superior e/ou Plistocénico. As Areias de Cordinhã são equivalentes das Areias de Mala (Dinis, 2004), enquanto as Cascalheiras de Gordos têm equivalência com as Areias de Vale do Grou-Areias e Conglomerados de Carqueijo (Dinis, 2004). Genericamente, a formação é constituída por quartzarenitos finos a muito finos, bem calibrados, amarelo torrados e com seixo pequeno, seguidos de arcossarenito a quartzarenitos grosseiros com seixo quartzoso, subanguloso a sub-rolado. Revelam, com fraca nitidez, estruturas planares e curvilíneas entrecruzadas (Barbosa *et al.*, 1988). A plataforma Gordos-Meco exhibe arcossarenitos grosseiros, conglomeráticos, com cascalheiras e seixos subangulosos a sub-rolados de quartzo e quartzito, sobrepostos às areias.

As Areias de Arazede - Q¹ (Soares, 1966) ocorrem nas proximidades da localidade com o mesmo nome (Arazede), a norte e a sul, e recobrem as unidades Jurássicas. As espessuras são de cerca de 5 a 15 m e segundo Barbosa *et al.* (1988) e Soares *et al.* (1989) pertencem ao Siciliano (?). Têm presença de quartzarenitos a arcossarenitos médios a grosseiros, de cor

amarela, com alguns seixos pequenos bem rolados, estando patente estratificação entrecruzada bem marcada por feixes curvilíneos.

A plataforma de Cantanhede-Mira identificada por Carvalho (Soares de Carvalho, 1952; 1964), com depósitos detríticos superficiais constituídos por cascalhos arenosos (com e sem seixos), engloba as formações das Areias de Cantanhede (Q²) e das Areias de Arazede. A maioria dos depósitos de Areias de Cantanhede surge entre Cadima e Fervença, observando-se seixos, soltos à superfície, devido à ação da deflação (Barbosa *et al.*, 1988). Serão do Siciliano (?) e as espessuras têm de 5 a 15 m (Barbosa *et al.*, 1988).

As Areias hidro-eólicas (Ae) são finas, bem calibradas, que aparecem nas áreas interdunares das dunas (dd), depositadas em meio subaquático, apesar de terem sofrido transporte eólico. Na metade oeste da bacia hidrográfica é onde existe grande representatividade das dunas. Os Eluviões areníticos (Ea) e carbonatados (Ec), correspondem a solos residuais resultantes de substratos areníticos e/ou arenítico-argilosos (Ea), ou a solos residuais carbonatados (Ec). Os eluviões areníticos encontram-se, essencialmente, a NW de Cadima e de Arazede, enquanto os carbonatados se identificam nos arredores de Arazede, bem como a NE da exurgência. Ao longo dos leitos das linhas de água os aluviões (a) ocorrem com frequência.

2.5.3 - Geologia de subsuperfície

A cobertura sedimentar existente nas zonas de estudo impossibilita a observação direta de algumas das formações. A informação fornecida pela geologia subsuperficial, através dos furos de sondagem, permite reconhecer as estruturas geológicas em profundidade e melhorar o conhecimento da geologia em profundidade (Figueiredo, 2001).

Os trabalhos desenvolvidos na região por Marques da Silva (1990), Rocha (1993), Condeso de Melo (2002) e Heen (2002) apresentam uma compilação de dados de furos de sondagem de captação de água, permitindo, através da informação dos *logs* dos furos, o estabelecimento de correlações entre furos e a construção de perfis litológicos.

Em alguns desses perfis litológicos identifica-se para o soco xistoso a tendência generalizada de afundamento regional, progressivo sob a forma de estrutura de teclas de piano para oeste, resultante do padrão de fraturação regional. Figueiredo (2001) identificou um afundamento do soco para SSW e refere que o soco xistoso se encontra mais próximo da superfície a norte. No entanto, localmente, além da existência de blocos abatidos é, também, possível detetar movimentos ascendentes que promovem a subida de blocos, como evidenciado nos trabalhos de Rocha (1993) e de Figueiredo (2001).

Na Figura 2.24 (a) apresenta-se a distribuição espacial de um conjunto de sondagens mecânicas, realizadas na área da BhF para exploração de água subterrânea, e a sistematização da respetiva informação litológica (Figura 2.24 (b)). A profundidade máxima das sondagens varia entre, cerca de, 17 m e 210 m. As sondagens intersectam materiais como solo, areia argilosa, argila, arenito de diferente granulometria, marga e calcário (que pode ser maciço, margoso, fraturado e, em alguns casos, ocorre a intercalação de níveis fraturados na rocha maciça). As formações carbonatadas corresponderão às unidades jurássicas e os arenitos às unidades cretácicas, anteriormente descritas.

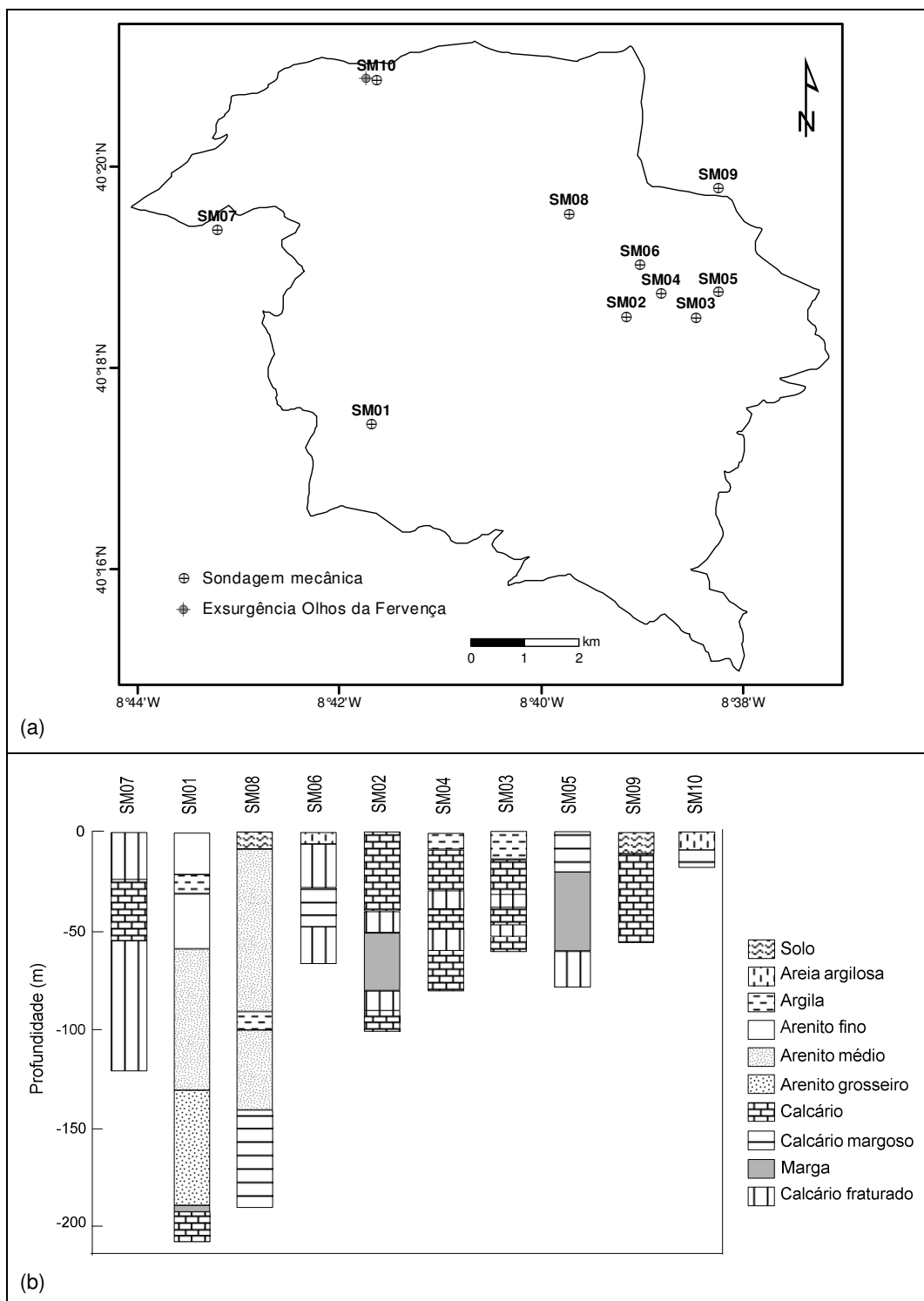


Figura 2.24 - Distribuição espacial das sondagens mecânicas SM01 a SM10 (a) e representação dos logs dos furos (b) (adaptado de Heen, 2002).

Do trabalho de Condesso de Melo apresenta-se o log de um furo localizado em Palhaça, a cerca de 6 km para NE da MhM (Figura 2.25), que possibilita a visualização da sequência cretácica, desde o Grés de Oiã ao Grés da Palhaça, sobrejacente ao Jurássico alcançado em profundidades ligeiramente superiores aos 60 m.

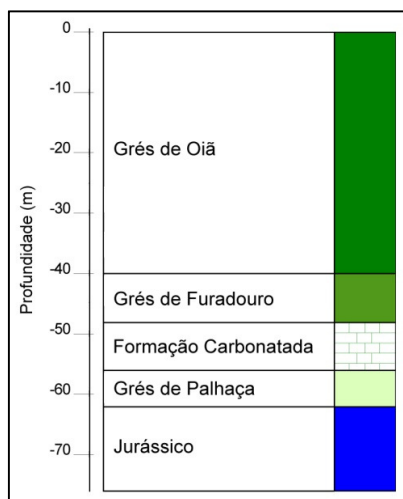


Figura 2.25 - Sondagem de furo em Palhaça (adaptado de Condesso de Melo, 2002).

2.6 - Enquadramento estrutural da região de Cantanhede

A reativação das estruturas hercínicas revela-se como condicionante da evolução estrutural da Bacia Lusitânica a partir do Triássico superior (Wilson *et al.*, 1989), em especial a fraturação tardi-hercínica orientada segundo as direções NNE-SSW a ENE-WSW (Pinheiro *et al.*, 1996).

O Mesozóico caracteriza-se por ser um período tectónico distensivo ao qual se seguiu a compressão cenozóica (Kullberg *et al.*, 2006; 2013). A margem continental oeste-ibérica esteve sujeita a importantes deformações alpinas ao longo do Cenozóico (Mougenot, 1989), em que a inversão tectónica (Ribeiro *et al.*, 1979; 1990; Rasmussen *et al.*, 1998; Alves *et al.*, 2003; Kullberg *et al.*, 2006; Reis & Pimentel, 2010; Kullberg *et al.*, 2013) favoreceu a elevação e respetiva exposição das formações depositadas no Mesozóico. A inversão tectónica nas bacias sedimentares mesozóicas leva ao desenvolvimento de estruturas compressivas, dobras e cavalgamentos, com diversas orientações, nomeadamente E-W, NE-SW, NW-SE e N-S (Sainz & Faccenna, 2001). Machadinho (2008) e Machadinho *et al.* (2010) referem que, na área da Serra da Boa Viagem, é evidente esta tendência na fraturação E-W, NE-SW e NW-SE.

No litoral, o levantamento quaternário é evidenciado pela presença de plataformas de abrasão marinha e de sedimentos litorais plio-quaternários elevados (Cabral & Ribeiro, 1989). Segundo estes autores e Ribeiro *et al.* (1979) a tensão tectónica quaternária reativou descontinuidades estruturais herdadas da orogenia varisca, de modo que se identificam em Portugal falhas ativas com uma componente predominante de movimentação inversa, com movimento predominante de desligamento e com movimentação normal. Os sedimentos pliocénicos e quaternários evidenciam sinais de deformação tectónica ligada a deformação sin-sedimentar e a deformação terciária-quaternária na região associa-se parcialmente ao rejogo de estruturas hercínicas (Dinis, 2004).

De acordo com Cabral (1995), após o período Miocénico de intensa atividade tectónica seguiu-se relativa acalmia no Pliocénico, tendência que se inverteu no final desta época com nova acentuação da atividade tectónica, a qual viria a prolongar-se pelo Quaternário (Ribeiro *et al.*, 1979; Lepvrier & Mougenot, 1984; Ribeiro, 1988; Mougenot, 1989). O campo de tensões no Pliocénio apresentava-se essencialmente orientado N-S, tendo rotação para NW-SE ou WNW-ESE, durante o Quaternário (Ribeiro, 1984; Ribeiro *et al.*, 1996). Herraiz *et al.* (2000)

referem que atualmente a zona ocidental da Península Ibérica revela uma tendência compressiva dirigida NW-SE, conjugada com a compressão E-W.

Na região de Cantanhede, a tectonização afetou os sedimentos até finais do Cretácico, e os depósitos quaternários apresentam-se apenas localmente deslocados (Barbosa, 1981a).

Castilho (2008) apresenta uma compilação das estruturas regionais mais significativas identificadas nos trabalhos de Cabral & Ribeiro (1988), Barbosa *et al.* (1988) e de Soares *et al.* (1993) para parte da zona litoral ocidental e da qual se pode ver um extrato na Figura 2.26. As unidades morfoestruturais propostas por Dinis (2004) para a região estão na Figura 2.27.

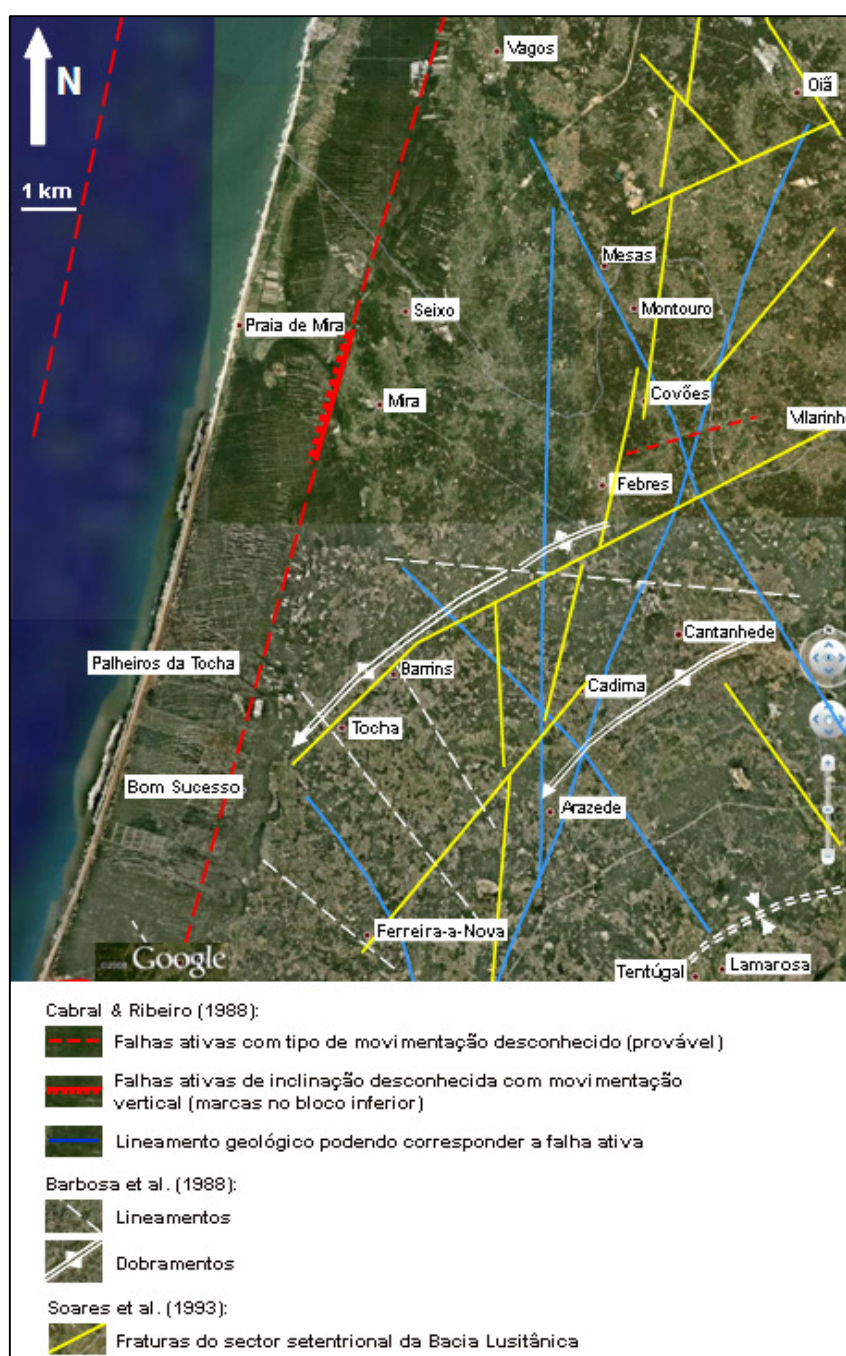


Figura 2.26 - Mapa com enquadramento tectono-estrutural da região (adaptado de Castilho, 2008).

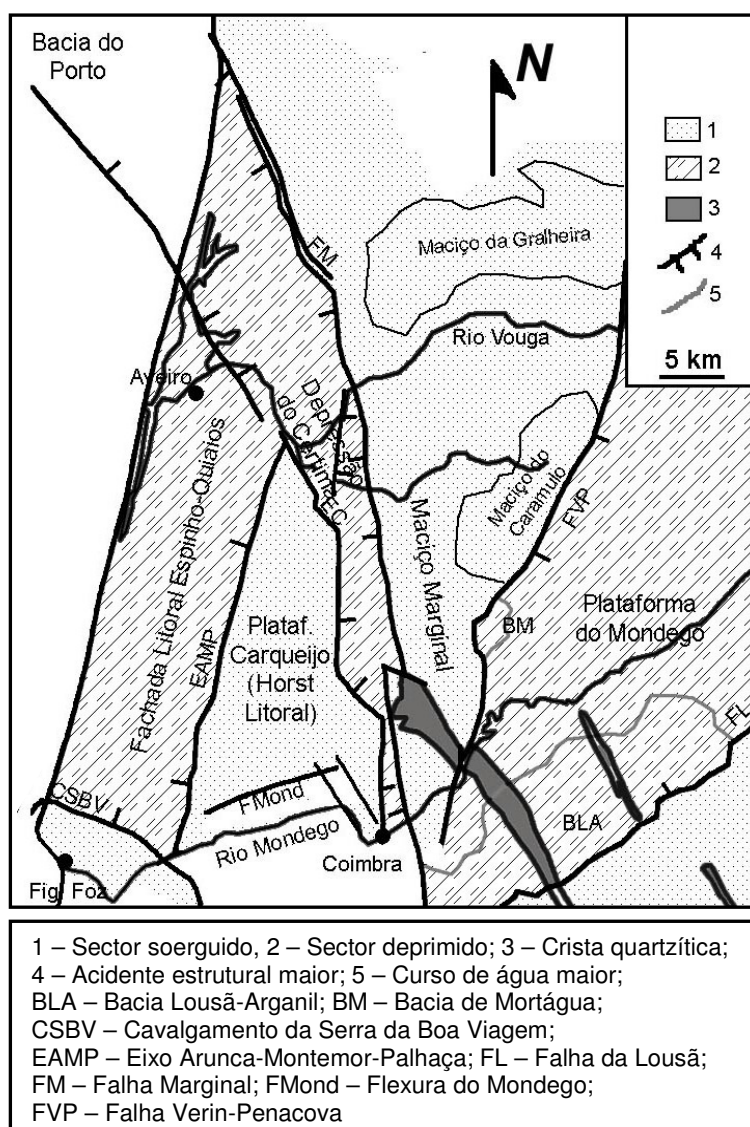


Figura 2.27 - Mapa com unidades morfoestruturais e enquadramento regional (adaptado de Dinis, 2004).

Identificam-se lineamentos geológicos, que poderão corresponder a falhas ativas, com orientação aproximada N-S e NNE-SSW cortados por outros orientados sensivelmente NW-SE (Cabral & Ribeiro, 1988). Daqui resultaram locais propícios à sedimentação de depósitos quaternários, consequência do afundimento do sector a oeste, de que é exemplo a bacia de Viso-Queridas (Barbosa *et al.*, 1988).

Destacam-se, igualmente, um conjunto de fraturas do sector setentrional da Bacia Lusitânica (Soares *et al.*, 1993) com direções de N-S a NNE-SSW intercetadas por falhas ENE-WSW. O eixo Arunca-Montemor-Palhaça (Soares *et al.*, 1988; 1998) revela-se como uma das estruturas responsáveis pela evolução sedimentar da região, tem orientação NNE-SSW e terá funcionado como desligamento esquerdo (Ribeiro, 1988; Ribeiro *et al.*, 1990). A oeste do alinhamento estrutural Palhaça-Mamarrosa-Febres a cobertura da região apresenta um ligeiro basculamento para NW (Barbosa, 1981a).

As falhas de Pocariça-Ferraria (no seguimento do *graben* de Antuzede da Bacia do rio Mondego) e os lineamentos de Resgatados-Barrins, de Gatões-Tocha e de Queridas

constituem algumas das estruturas orientadas para NW e que se alinham com a orientação superficial da drenagem (Barbosa *et al.*, 1988). Salienta-se a zona de vale da Ribeira de Varziela, ligeiramente a norte de Cantanhede, que corresponderá a uma falha provável com direção aproximada W-E (WSE-ENE). Segundo Almeida *et al.* (2000c) é provável que esta estrutura de orientação W-E tenha incidência na parte do sistema aquífero que é drenado pela exsurgência Olhos da Fervença.

Quanto aos dobramentos, com orientação geral NE-SW, têm eixos quase paralelos entre si identificando-se o anticlinal de Cantanhede, que separa as bacias hidrográficas do Mondego e do Vouga, o anticlinal de Tocha-Mogofores (Choffat, 1900) e o provável sinclinal de Pena-Tentúgal (Barbosa *et al.*, 1988). Na parte interna do alinhamento estrutural Palhaça-Mamarrosa-Febres desenha-se uma série de sinclinais e anticlinais, mas sempre de carácter sub-tabular, isto é, com inclinações muito pequenas, em regra inferiores a $5-10^\circ$ (Ribeiro, 2012).

O anticlinal de Montouro-Mesas, com eixo de dobramento SE-NW e com um ligeiro pendor para NW e flancos com inclinação inferior a 10° (Barbosa, 1981a), é outra das estruturas regionais, que apesar de menor expressão, afeta localmente os sedimentos cretácicos e jurássicos.

O anticlinal de Cantanhede apresenta-se cortado por falhas NW-SE e pelo eixo Arunca-Montemor-Palhaça, que simultaneamente interrompem o sinclinal Pena-Tentúgal. Por sua vez, o anticlinal Tocha-Mogofores revela componente de desligamento e corta várias fraturas de rumo meridiano que controlam a depressão do Cértima (Soares *et al.*, 1986; Dinis, 2001b) e o *Horst* Litoral (Dinis, 2004), sendo intercetado por fraturas NW-SE, N-S ou NNE-SSW, responsáveis por deslocamentos subverticais com basculamento de blocos (Dinis, 2004). É no bordo ocidental da estrutura anticlinal Tocha-Mogofores que se localiza a exsurgência Olhos da Fervença.

Além destes acidentes estruturais de maior importância regional, deve referir-se a existência de duas falhas que se intercetam nas imediações da nascente Olhos da Fervença, com direções $N59.5^\circ E$ e $N51^\circ W$ (Figura 2.23 e Figura 2.28), quase perpendiculares entre si e que certamente influenciarão a geometria do aquífero (Marques da Silva, 2009).

Marques da Silva (2009) refere, com base em trabalhos de prospeção geofísica, a existência de dois sistemas de fraturação (NW-SE e NE-SW) e de três blocos abatidos, com deslocamento vertical descendente. Estes blocos localizam-se entre Taboeira (N) e Quinta das Cabadas e Fontinhas (S); Casais dos Faíscas (N) e Resgatados e Bebedouro (S); e Sanguinheira e Gesteira (N) e Arneiro Tecelão, Bunhosa e Moita Vaqueira (S). Os blocos abatidos situam-se no sector NE, W e SW da bacia hidrográfica de Fervença propiciando o movimento geral ascendente da área compreendida entre Quinta das Cabadas e Nogueiras.

Com base na interpretação geofísica, Heen (2002) apresenta um mapa representativo das estruturas geológicas da zona. Na Figura 2.28 está a compilação das estruturas identificadas por Heen (2002) e assim como por Barbosa *et al.* (1987-88; 1988).

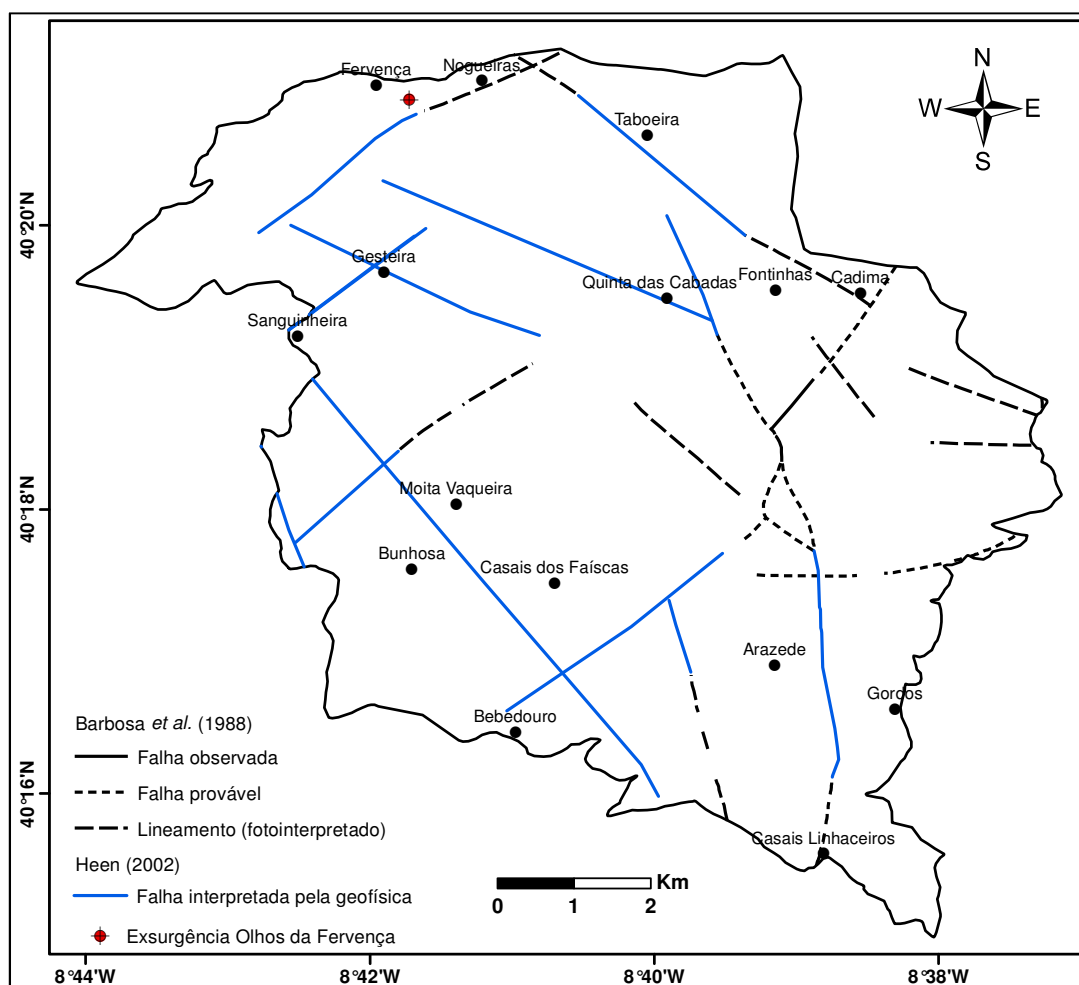


Figura 2.28 - Mapa estrutural da BhF (adaptado de Barbosa *et al.*, 1987-88; 1988; Heen, 2002).

A forte presença de depósitos de cobertura nas áreas em estudo dificulta a observação da existência de possíveis estruturas, e apesar de alguns elementos indiciadores da sua presença existe escassez na sua cartografia. Numa tentativa de detetar possíveis alinhamentos estruturais, procedeu-se à elaboração duma análise com base no modelo digital do terreno com o *software* ArcGIS (ESRI Inc., 2010), recorrendo à utilização da ferramenta de sombreamento, à semelhança do que Pearson (2001) fez no seu trabalho. Foram elaborados relevos sombreados a partir de uma superfície “raster” (com resolução de, aproximadamente, 27 m × 27 m), levando em consideração os ângulos da fonte de iluminação e das sombras. O ângulo da altitude da fonte de luz acima do horizonte considera 0° no horizonte e 90° na vertical, tendo-se optado pelo ângulo médio de 45° em todas as análises. Quanto ao ângulo de azimute da fonte de luz, este é medido a partir do norte no sentido dos ponteiros do relógio.

Na Figura 2.29 apresenta-se a identificação dos alinhamentos estruturais obtidos para ângulos de azimute de 315° (a), de 90° (b) e de 45° (c). Não foram delimitados todos os alinhamentos estruturais existentes na região, tendo existido a preocupação em restringir a análise às áreas em estudo e suas envolventes. A Figura 2.29 (d) resulta do cruzamento da informação das cartas de cada azimute, correspondendo à identificação dos possíveis alinhamentos estruturais presentes nas áreas em apreciação.

A análise da Figura 2.29 permite identificar as seguintes famílias de alinhamentos preferenciais: E-W; N-S; N78°E; N25-35°E; N45°E; N5-10°W; N20-25°W; N40-45°W e N70°W.

Algumas destas direções são também indicadas por Machadinho (2008) e Machadinho *et al.* (2010). Estes autores referem que, no Cretácico, entre o Aptiano e o Campaniano, o campo de tensões pode ser explicado por um sistema Riedel esquerdo, com direção E-W, que parece ter conduzido ao desenvolvimento de fraturas profundas, distensivas, de orientação paralela à tensão dominante (NE-SW), em conjunto com fraturas conjugadas de direções N45°E, N75°W, N15°E, N75°E.

As estruturas mencionadas neste subcapítulo resultaram da evolução da deformação ao longo da história geológica e, sobretudo, da reativação mesozóico-cenozóica de um substrato marcado pela orogenia tardi-hercínica (Azerêdo *et al.*, 2003; Castilho, 2008).

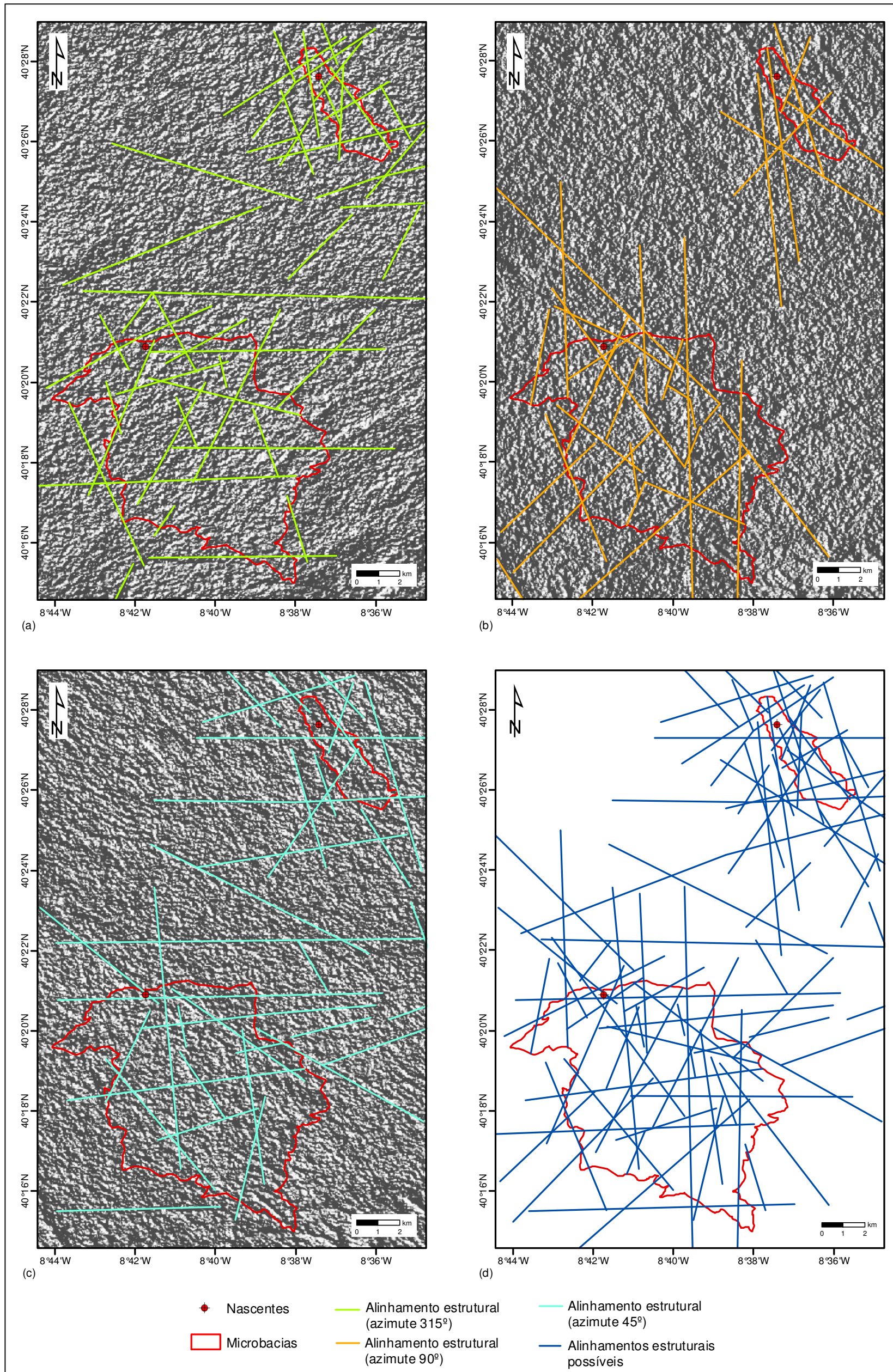


Figura 2.29 - Alinhamentos estruturais inferidos a partir da análise de relevo sombreado, com azimute de 315° (a), 90° (b) e 45° (c). Carta final dos alinhamentos estruturais identificados nas áreas de estudo (d).

2.7 - Mineralogia associada à exurgência de Montouro

Numa das campanhas de campo procedeu-se à recolha de uma amostra da argila existente no local da nascente de Montouro, com intuito de identificar os minerais dominantes através da análise por difração de raios-X. A argila foi recolhida no interior do poço, exatamente no local de emergência da água (Figura 2.30). A preparação da amostra decorreu no Laboratório de Sedimentologia e a sua análise no Laboratório de Difração e Fluorescência de Raios X, ambos do Departamento Ciências da Terra, da Universidade de Coimbra.



Figura 2.30 - Pormenor do local da nascente da água de Montouro (a) e do estrato argiloso amostrado (b).

Os resultados da amostra total permitiram identificar a presença de minerais como quartzo, feldspato, moscovite e caulinite (Figura 2.31). Da amostra total selecionou-se a fração argilosa, inferior a 2 μm , sobre a qual se realizou a difração de raios-X na lâmina seca ao ar (normal), após ser mergulhada em glicol e depois de aquecida (Figura 2.32). É possível indicar a existência de esmectite (7 %), caulinite (22 %) e mica-ilite como elemento dominante (71 %).

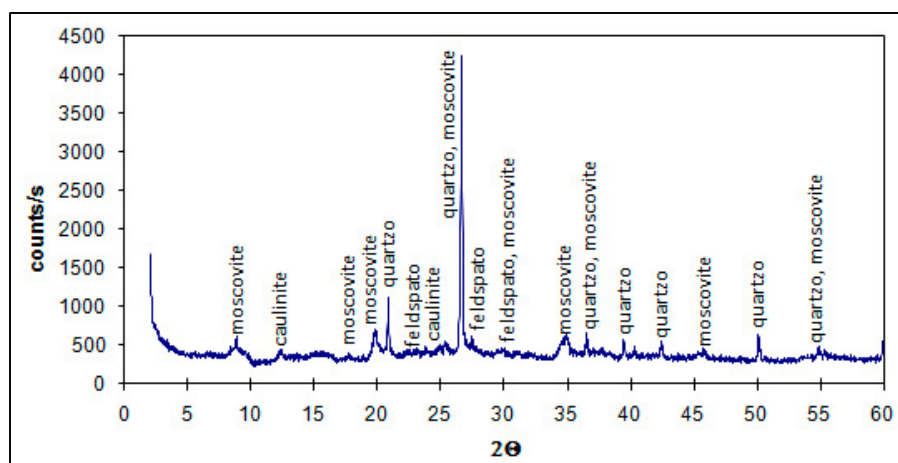


Figura 2.31 - Minerais identificados na amostra total, por difração de raios-X.

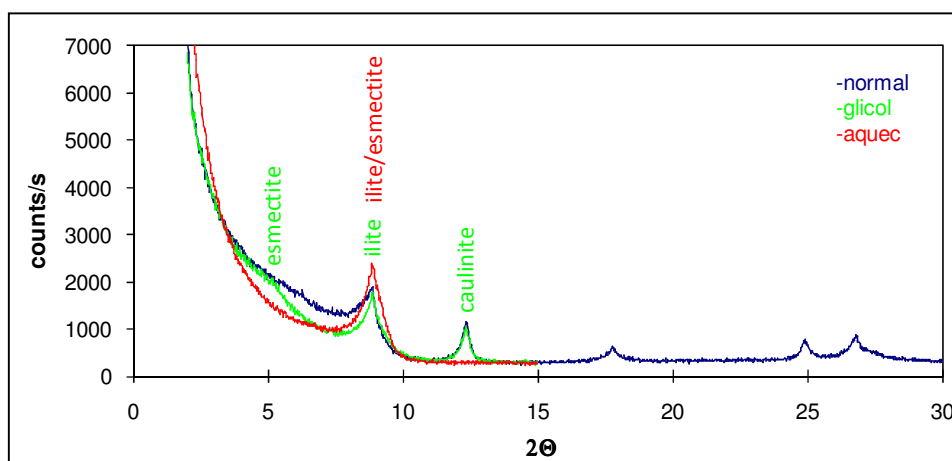


Figura 2.32 - Minerais identificados na fração inferior a 2 µm, por difração de raios-X.

Os minerais identificados na fração argilosa amostrada são coincidentes com alguns dos referidos por outros autores em estudos na região, nomeadamente Barbosa (1981a), Rocha & Gomes (1992) e Rocha (1993).

Barbosa (1981a) refere para as Argilas de Vagos uma composição essencialmente em termos de illite e quartzo, com a fração inferior a 2 µm a caracterizar-se por predomínio da illite, acompanhada de baixa percentagem de caulinite, ou montmorilonite, logo que a granulometria passa a siltosa ou areno-siltosa.

Estudos mineralógicos desenvolvidos na região de Aveiro por Rocha (1993), utilizando a análise por difração de raios-X e por microscopia eletrónica de transmissão, mostram que as unidades do Quaternário são compostas essencialmente por quartzo, plagioclase, feldspato potássico, calcite e dolomite. O gesso, anidrite, opala e zeólitos, entre outros, podem ocorrer como minerais acessórios, sendo a illite, esmectite e caulinite os minerais de argila mais abundantes. Nas unidades cretácicas as principais associações minerais são, em termos gerais, semelhantes (quartzo, filossilicatos, calcite, dolomite, feldspato potássico e plagioclase). Os minerais acessórios são normalmente o gesso, anidrite, jarosite (a partir da oxidação da pirite), melanterite, pirite e goetite. Quanto aos minerais argilosos temos a presença de caulinite, esmectite e illite (Tabela 2.8).

Tabela 2.8 - Associações de minerais argilosos características das unidades cretácicas da região de Aveiro (Neto *et al.*, 1998) e correlação com as unidades cretácicas da MhM.

Litoestratigrafia		Litologia	Associações de minerais argilosos
Região de Aveiro	MhM		
Argilas de Aveiro	Argilas de Vagos	argilas margosas	illite-esmectite-caulinite
Grés de Verba	Grés de Verba Grés de Picoto-Siadouro	arenitos argilosos	caulinite-esmectite-illite
Grés de Oiã	Grés de Oiã	arenitos sub-arcósicos	caulinite-illite
Grés micáceo	Grés de Furadouro	arenitos micáceos	illite-caulinite-esmectite
Formação carbonatada	Calcários de Mamarrosa	margas, calcários margosos	caulinite-esmectite-illite
Grés da Palhaça	Grés da Palhaça	arenitos arcósicos	caulinite-illite-esmectite

2.8 - Tipologia, uso e ocupação do solo

A identificação do tipo de solo presente nas bacias hidrográficas foi feita recorrendo a informação cartográfica digital disponibilizada pela Agência Portuguesa do Ambiente – APA, como parte integrante do Atlas do Ambiente Digital, designada Carta dos Solos (CNA, 1978).

Apresenta-se a caracterização das unidades pedológicas, com base na classificação FAO – *Food and Agriculture Organization* (FAO, 1988), a sua distribuição espacial, a quantificação das respetivas áreas e a percentagem relativamente à área total da bacia hidrográfica (Figura 2.33, Figura 2.34 e Tabela 2.9).

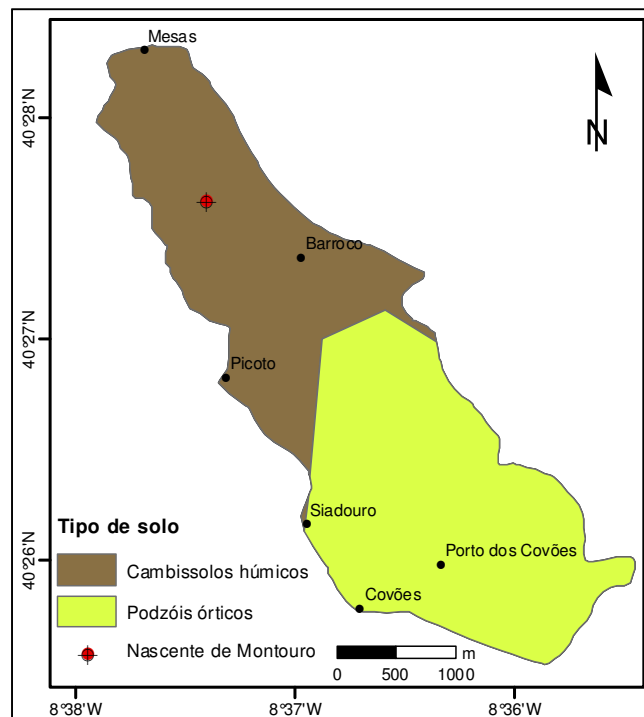


Figura 2.33 - Tipos de solo na microbacia hidrográfica de Montouro (adaptado de CNA, 1978).

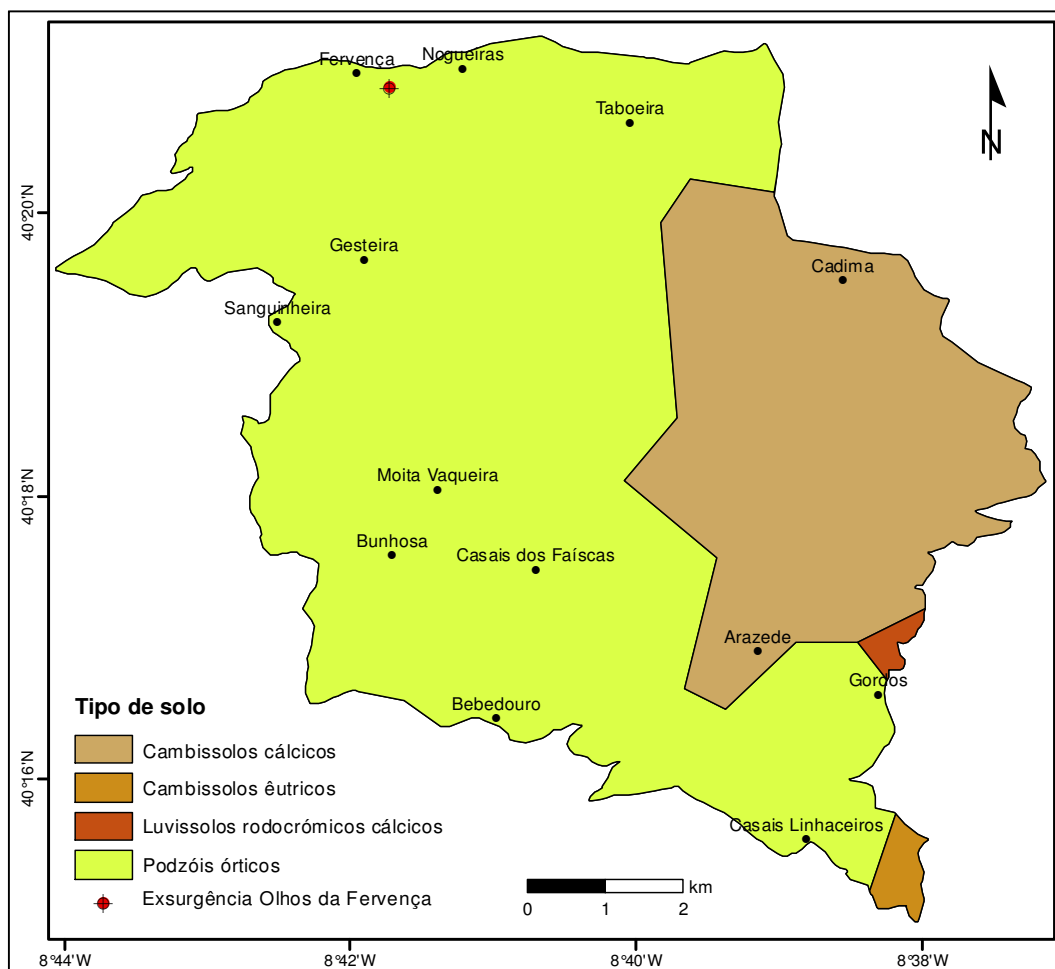


Figura 2.34 - Tipos de solo na bacia hidrográfica de Ferverença (adaptado de CNA, 1978).

Tabela 2.9 - Áreas do tipo de solo na MhM e na BhF.

	Código	Designação	Especificidades de solos	Área	
				(km ²)	(%)
MhM	711	Cambissolos húmicos	rochas sedimentares post-Paleozóicas	2.87	44.8
	903	Podzóis órticos	associados a Cambissolos calcários	3.53	55.2
BhF	716	Cambissolos cálcicos	rochas sedimentares post-Paleozóicas	16.45	26.9
	715	Cambissolos éutricos		0.47	0.8
	803	Luvisolos rodocrômicos cálcicos		0.25	0.4
	903	Podzóis órticos		44.01	71.9

Na BhF existe maior diversidade de tipos de solo (quatro classes) relativamente a MhM (duas classes), verificando-se, em ambas, predomínio de podzóis órticos. Na área da microbacia hidrográfica de Montouro ocorrem também cambissolos húmicos, com distribuição em cerca de 45 % da área total. Na bacia hidrográfica de Ferverença existem cambissolos éutricos e luvisolos em percentagens muito reduzidas para além de cambissolos cálcicos, em aproximadamente 27 % da área.

Considerando a base de referência mundial para os recursos do solo (IUSS Working Group WRB, 2006), apresenta-se uma breve definição do tipo de solos existentes nas áreas de estudo:

- Cambissolos combinam solos com pelo menos uma formação de solo incipiente na subsuperfície. A transformação do material de origem (pode ser material do próprio local ou de sedimentos aí depositados) é evidente a partir da estrutura da formação e, principalmente, pela coloração acastanhada, aumentando a percentagem de argila, e/ou eliminação de carbonatos. Têm textura franco arenosa, ou mais fina, e no mínimo 8 % de argila;
- Luvisolos possuem maior teor de argila no subsolo que na superfície do solo como resultado de processos pedogenéticos (especialmente a migração de argila), levando à existência de um horizonte de subsolo argílico. Têm argilas de elevada atividade ao longo do horizonte argílico e uma alta saturação por bases em determinadas profundidades. Apresentam uma textura franco arenosa ou mais fina, com pelo menos 8 % de argila, e contêm mais argila que o horizonte suprajacente;
- Podzóis são solos com um horizonte subsuperficial cinzento (branqueado pela perda de matéria orgânica e óxidos de ferro) que ocorre no topo de um horizonte com húmus castanho, avermelhado ou preto e/ou com compostos de ferro avermelhados que se apresenta endurecido devido à cimentação provocada pelos óxidos.

Tendo como suporte a correspondência entre o tipo de solo e a classe de permeabilidade estabelecida em Feijó *et al.* (2012) para a bacia hidrográfica do Vouga, elaborou-se a Tabela 2.10 com a síntese para as áreas de estudo, constatando-se que os solos apresentam permeabilidade baixa a moderada.

Tabela 2.10 - Permeabilidade do solo na MhM e na BhF, com base na classificação de Feijó *et al.* (2012).

Tipo de solo	Classe de permeabilidade
Cambissolos	Baixa a moderada
Luvisolos	
Podzóis	

A caracterização do uso e ocupação do solo nas áreas de estudo tem por base dois documentos digitais disponibilizados pelo Instituto Geográfico Português (IGP): a cartografia de ocupação e uso do solo em 2006 para Portugal Continental (Mapa CORINE Land Cover 2006 – CLC06), com nomenclatura CLC e unidade mínima cartográfica de 25 ha (Caetano *et al.*, 2009), e a carta de uso e ocupação do solo de Portugal Continental para 2007 (Carta de Ocupação do Solo – COS2007), com unidade mínima cartográfica de 1 ha (IGP, 2010a; 2010b).

Da Figura 2.35 à Figura 2.38 apresenta-se a representação espacial do uso e ocupação do solo na MhM e na BhF, e na Tabela 2.11 e na Tabela 2.12, a síntese da quantificação das áreas e respetiva percentagem em relação à área total de cada bacia hidrográfica.

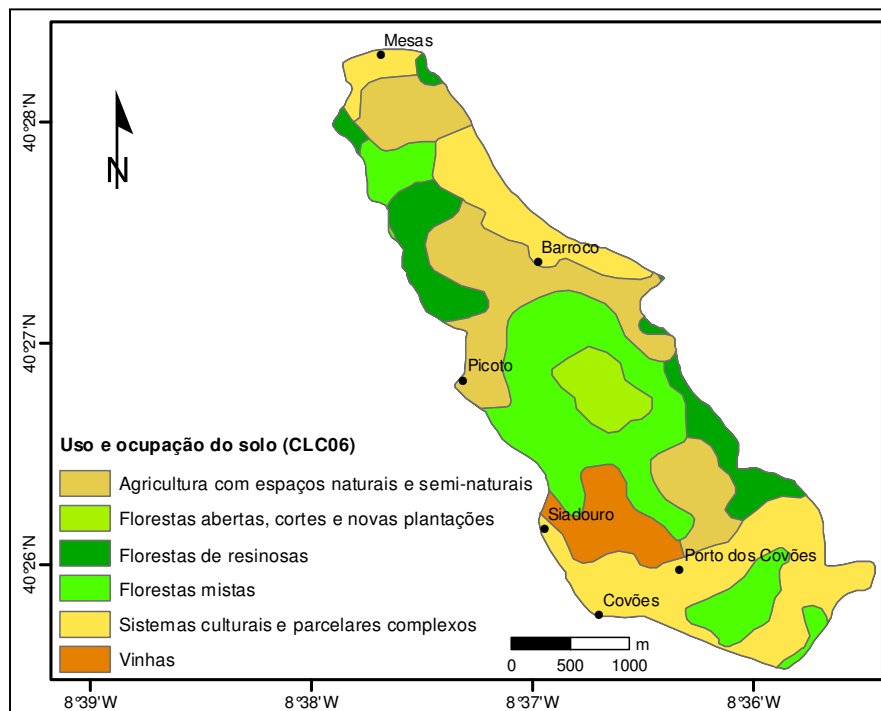


Figura 2.35 - Uso e ocupação do solo na MhM, com base na classificação CLC06 (adaptado de IGP, 2009).

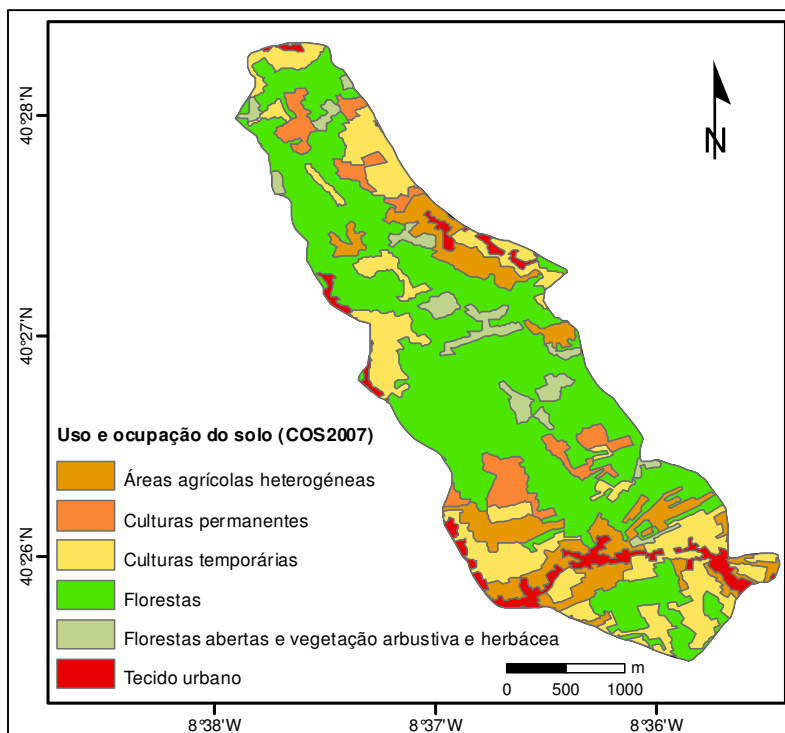


Figura 2.36 - Uso e ocupação do solo na MhM, com base na classificação COS2007 (adaptado de IGP, 2010a).

Tabela 2.11 - Áreas do uso e ocupação do solo na MhM.

	Código	Designação	Área	
			(km ²)	(%)
Classificação CLC06	243	Agricultura com espaços naturais e semi-naturais	1.52	23.7
	324	Florestas abertas, cortes e novas plantações	0.26	4.1
	312	Florestas de resinosas	0.68	10.6
	313	Florestas mistas	1.77	27.6
	242	Sistemas culturais e parcelares complexos	1.78	27.8
	221	Vinhas	0.40	6.2
Classificação COS2007	2.4	Áreas agrícolas heterogéneas	0.78	12.2
	2.2	Culturas permanentes	0.38	6.0
	2.1	Culturas temporárias	1.34	20.9
	3.1	Florestas	3.32	51.8
	3.2	Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea	0.30	4.6
	1.1	Tecido urbano	0.29	4.5

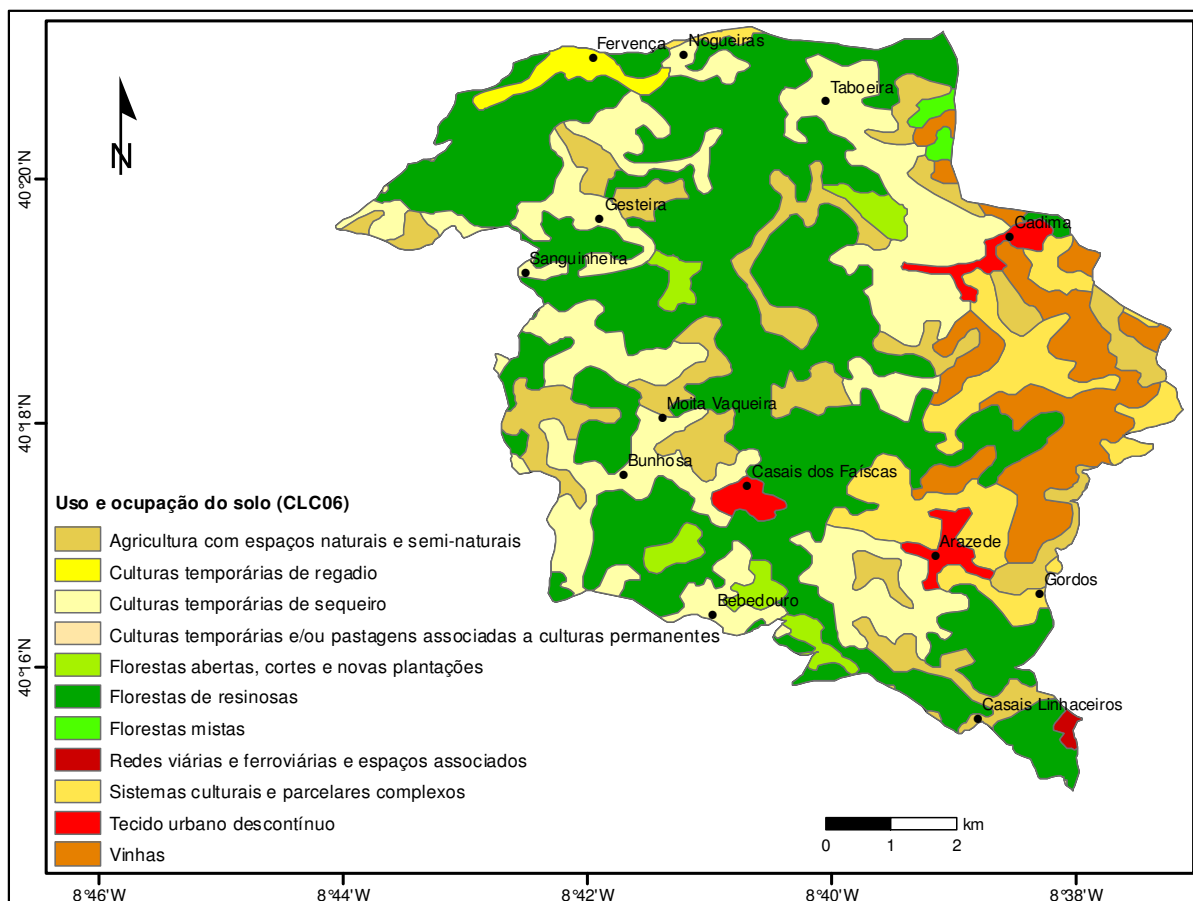


Figura 2.37 - Uso e ocupação do solo na BHF, com base na classificação CLC06 (adaptado de IGP, 2009).

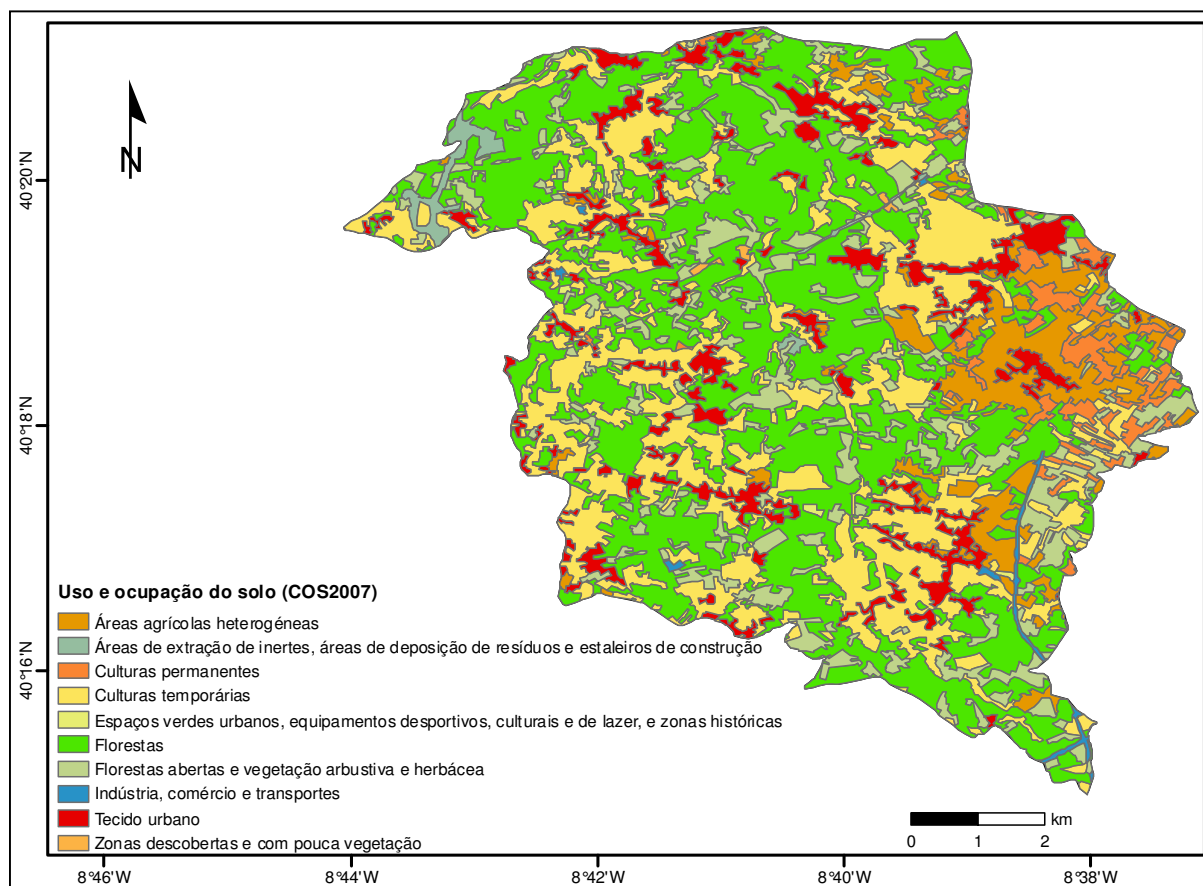


Figura 2.38 - Uso e ocupação do solo na BhF, com base na classificação COS2007 (adaptado de IGP, 2010a).

A comparação das duas classificações para a área da microbacia hidrográfica de Montouro permite constatar a ausência de informação de tecido urbano na classificação CLC06, e o aumento da área percentual ocupada por florestas na classificação COS2007. Considerando esta última classificação, ressalta a predominância das áreas ocupadas por florestas, com um total de aproximadamente 56 %, as atividades agrícolas perfazem cerca de 39 %, ficando a restante parte a ser atribuída a tecido urbano, que se encontra em minoria com apenas, cerca de, 5 %.

Na bacia hidrográfica de Ferverença, a análise da classificação CLC06 denota preponderância da agricultura, nas suas diversas formas (com cerca de 51 %), relativamente às áreas florestais (aproximadamente 46 %), sendo a ocupação humana significativamente menor. Quanto à classificação COS2007, constata-se o incremento dos espaços florestais (53 %) e da utilização humana (cerca de 9 %, resultante da soma do tecido urbano com a indústria, comércio e transportes), ocupando as atividades agrícolas aproximadamente 37 % da área total, ficando a área sobrance distribuída por extração de inertes, áreas de deposição de resíduos e estaleiros de construção, espaços verdes urbanos, equipamentos desportivos, culturais e de lazer, zonas históricas e zonas descobertas e com pouca vegetação.

Tabela 2.12 - Áreas do uso e ocupação do solo na BhF.

	Código	Designação	Área	
			(km ²)	(%)
Classificação CLC06	243	Agricultura com espaços naturais e semi-naturais	7.88	12.9
	212	Culturas temporárias de regadio	0.67	1.1
	211	Culturas temporárias de sequeiro	13.32	21.8
	241	Culturas temporárias e/ou pastagens associadas a culturas permanentes	0.002	0.003
	324	Florestas abertas, cortes e novas plantações	1.53	2.5
	312	Florestas de resinosas	26.54	43.4
	313	Florestas mistas	0.27	0.4
	122	Redes viárias e ferroviárias e espaços associados	0.11	0.2
	242	Sistemas culturais e parcelares complexos	4.73	7.7
	112	Tecido urbano descontínuo	1.29	2.1
	221	Vinhas	4.84	7.9
	Classificação COS2007	2.4	Áreas agrícolas heterogéneas	4.75
1.3		Áreas de extração de inertes, áreas de deposição de resíduos e estaleiros de construção	0.61	1.0
2.2		Culturas permanentes	1.82	3.0
2.1		Culturas temporárias	15.90	26.0
1.4		Espaços verdes urbanos, equipamentos desportivos, culturais e de lazer, e zonas históricas	0.06	0.1
3.1		Florestas	25.13	41.1
3.2		Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea	7.30	11.9
1.2		Indústria, comércio e transportes	0.30	0.5
1.1		Tecido urbano	5.22	8.5
3.3		Zonas descobertas e com pouca vegetação	0.09	0.2

Capítulo 3 - Prospeção Geofísica

Os métodos geofísicos, não invasivos, por comparação com a aplicação de métodos diretos, têm a capacidade de prever a distribuição de determinados parâmetros de forma mais realista, possibilitando, por exemplo, a utilização de propriedades geohidráulicas na modelação do fluxo da água e da migração de substâncias contaminantes (Börner, 2009). Kearey *et al.* (2002) referem a aplicabilidade de métodos de prospeção geofísica, ou levantamentos geofísicos, em áreas restritas para determinar a distribuição das propriedades físicas em profundidades que refletem a geologia de subsuperfície local.

A seleção dos métodos e técnicas, assim como o tipo de equipamento mais apropriado para a resolução de um determinado problema, depende, principalmente, do contraste das propriedades físicas envolvidas entre a estrutura do alvo e o meio circundante, da resolução pretendida e das características dos diferentes equipamentos, tais como a sua profundidade de investigação e a relação sinal/ruído (Cruz, 2008). O método de prospeção geofísica escolhido foi o eletromagnético, que recorre a campos eletromagnéticos produzidos à superfície do terreno através da utilização de antenas ou da circulação de corrente alterna em cabos ou em bobines. Este método geofísico é um dos muitos disponíveis e com aplicação para obter informação subsuperficial.

As técnicas de prospeção geofísica, especificamente os métodos eletromagnéticos no domínio tempo e frequência, têm aplicação muito vasta com utilização em diferentes áreas, designadamente na pesquisa de recursos geológicos, em estudos arqueológicos, no âmbito da geotecnia, em investigações hidrogeológicas, na deteção de problemas ambientais, entre outras (Tabela 3.1). Os trabalhos de Figueiredo (2006), Auken *et al.* (2008), Corriolis *et al.* (2009), Massoud *et al.* (2010), Ezersky *et al.* (2011), Carvalho *et al.* (2012a), Viganotti *et al.* (2013) constituem exemplos, recentes, demonstrativos da aplicabilidade referida.

Tabela 3.1 - Áreas de aplicação e alvos de estudo na prospeção geofísica eletromagnética (adaptado de Everett, 2013).

Alvos de estudo		
Resistivos	Intermédios	Condutores
Depósitos detríticos	Falhas, zonas de fratura	Intrusão de água salgada
Rochas cristalinas	Estruturas arqueológicas	Plumas salinas e inorgânicas
Zonas cársticas	Agricultura	Lenticulas argilosas, solos argilosos
	Aquíferos	Conduções, cilindros de aço

Este capítulo aborda as noções teóricas relativas ao método de prospeção geofísica implementado, com o objetivo de evidenciar o princípio de funcionamento do método, a metodologia de aquisição de dados no campo, o tratamento desses dados recolhidos e a respetiva interpretação. A execução de campanhas de prospeção eletromagnética teve como objetivo a caracterização dos sistemas aquíferos em estudo, com a deteção de estruturas geológicas associadas à ocorrência das respetivas exurgências e, especificamente, contribuir para o esclarecimento da origem da água mineralizada de Montouro.

3.1 - Métodos eletromagnéticos

O uso dos métodos eletromagnéticos é cada vez mais corrente devido à facilidade de operação com os equipamentos de medida e à rápida aquisição de dados. Estes métodos têm grande aplicação em zonas com camadas superficiais muito resistivas, ou seja, onde os métodos elétricos de resistividade são de difícil execução; no entanto, num ambiente urbano, com elevado ruído eletromagnético, em locais onde existam metais na proximidade dos pontos de medida e em zonas com linhas de transporte de energia e telecomunicações (exceto cabos de fibra ótica), a sua aplicação não é aconselhada devido ao ruído que essas estruturas provocam nas medidas (Correia *et al.*, 2008; 2010a).

Os métodos eletromagnéticos baseiam-se nas equações estabelecidas por Maxwell, que propôs a teoria do campo eletromagnético (Lowrie, 2007). Estes métodos fazem uso da resposta dos terrenos à propagação de campos eletromagnéticos, que são compostos pela alternância da intensidade elétrica e da força magnética (Reynolds, 1997; Kearey *et al.*, 2002). A Figura 3.1 representa a onda eletromagnética com a flutuação perpendicular dos respetivos campos elétrico e magnético no plano normal à propagação. É nas interfaces entre meios que ocorrem as interações das ondas eletromagnéticas (Guru & Hiziroglu, 2004).

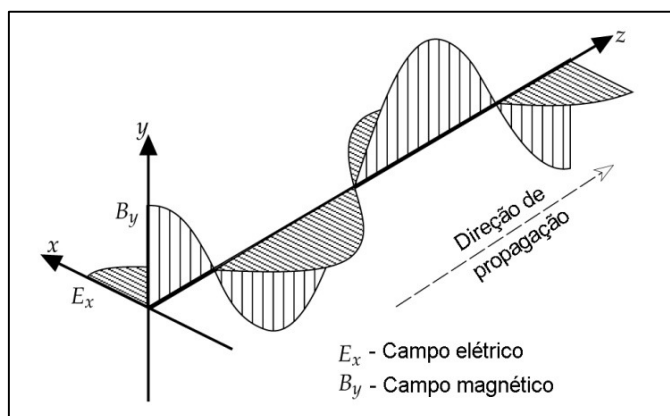


Figura 3.1 - Componentes da onda eletromagnética (adaptado de Lowrie, 2007).

Existe grande variedade de técnicas eletromagnéticas, no entanto, todas elas envolvem a medição de um, ou mais, componente do campo elétrico e/ou magnético por um recetor a partir de uma fonte de energia natural ou artificial, mas com controlo da fonte eletromagnética – o transmissor (Tx) gera à superfície um campo eletromagnético primário, através da circulação de uma corrente elétrica alterna em cabos ou em bobinas, que se propaga acima e abaixo do terreno. Se o subsolo for homogéneo, não existe diferença significativa entre os campos que se propagam acima e através do terreno (Reynolds, 1997). Caso existam estruturas condutoras em profundidade a componente magnética da onda induz correntes elétricas alternas, as quais originam um campo eletromagnético secundário, que se opõe ao campo eletromagnético primário e que é detetado à superfície por um recetor (Rx), que simultaneamente regista o campo primário propagado à superfície (Figura 3.2).

Apesar destes dois campos oscilarem com a mesma frequência, devido a fenômenos de indução relativos às correntes eletromagnéticas, eles alcançam os seus máximos em tempos desfasados (Figura 3.3). É a relação entre os dois campos eletromagnéticos que atravessam o recetor que possibilita obter um valor de condutividade elétrica aparente do terreno, evidenciando anomalias que podem indicar a presença de estruturas geológicas condutoras e fornecer informações sobre a respetiva geometria e as suas propriedades elétricas. Existe o registo combinado dos campos primário e secundário, no entanto, os campos secundários de interesse são pequenos em comparação com os campos primários (Telford *et al.*, 1990); segundo Kearey *et al.* (2002) todos os corpos anómalos com elevada condutividade elétrica produzem campos eletromagnéticos secundários fortes.

Este efeito de indução, de pequenas estruturas condutivas em meios pouco condutivos, torna-se mais visível pela medição da condutividade do que da resistividade (Milson, 2003), como tal os métodos eletromagnéticos privilegiam o registo desse parâmetro.

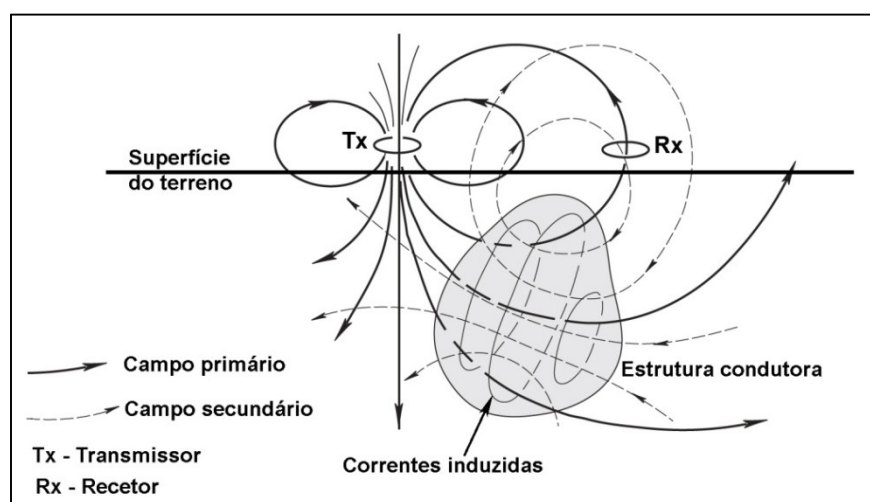


Figura 3.2 - Princípio de funcionamento dos métodos eletromagnéticos (adaptado de Grant & West, 1965; Reynolds, 1997; Everett, 2013).

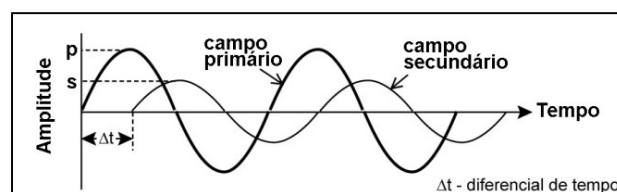


Figura 3.3 - Amplitudes e fases dos campos primário e secundário (adaptado de Lowrie, 2007).

A condutividade elétrica (σ) traduz a facilidade com que uma corrente elétrica atravessa um meio e tem unidades no Sistema Internacional de unidades (S.I.) de Siemens por metro (S/m); enquanto a resistividade (ρ) evidencia a dificuldade dessa passagem e as unidades S.I. são ohm.m ($\Omega.m$). A relação entre estes parâmetros é dada pela equação [3.1].

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad [3.1]$$

McNeill (1980a) indica que a condutividade elétrica aparente está relacionada com a estrutura do terreno (existência de fraturas e cavidades), o tipo de solo e rocha, a sua permeabilidade e porosidade, a quantidade de eletrólito nos poros, a concentração e composição de sais dissolvidos no eletrólito, a temperatura e estado físico da água nos poros. Sharma (1997) apresenta o exemplo da alta variabilidade da resistividade das formações sedimentares porosas de acordo com o grau de saturação, a natureza dos eletrólitos nos poros e a própria geometria desses poros, verificando-se por comparação que o contributo dos componentes mineralógicos da rocha para a condutividade é bastante menor.

A distribuição de um campo eletromagnético, num meio geológico particular, resulta de vários fatores sobretudo ligados à sua dependência do tempo e às características mineralógicas, petrológicas e estruturais do meio em si (Castilho, 2008). A Figura 3.4 tem uma síntese de valores de condutividade e resistividade de algumas rochas, solos e águas. Como se constata a maioria das rochas e solos são isoladores ou têm baixas condutividades.

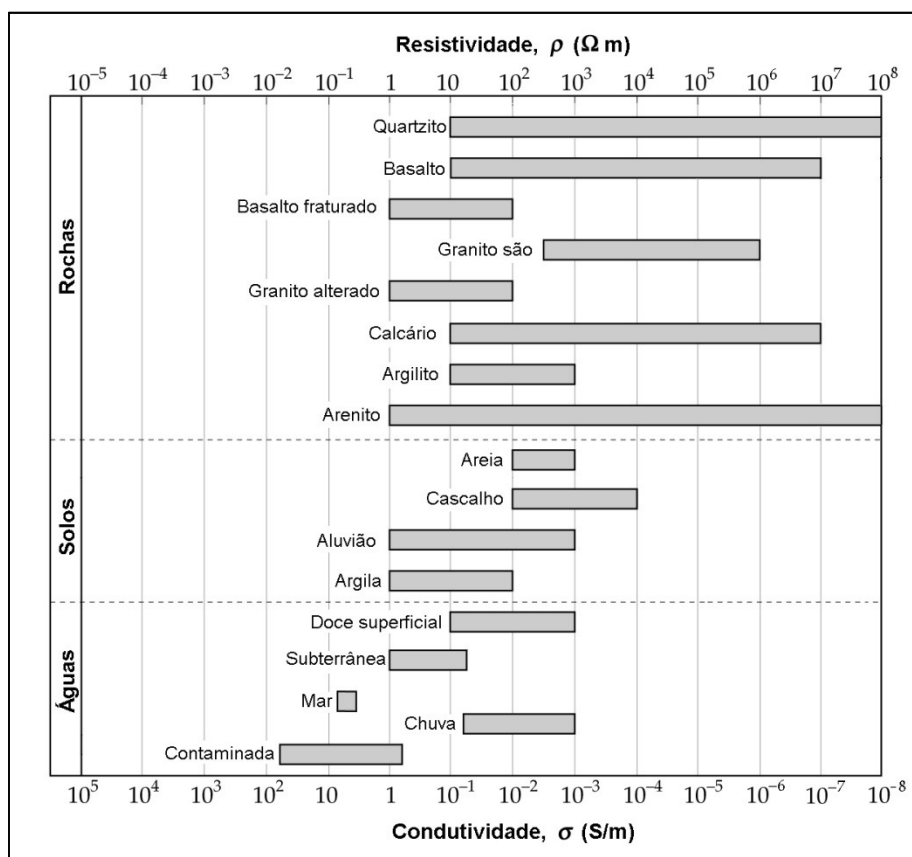


Figura 3.4 - Valores da condutividade e resistividade de algumas rochas, solos e águas (adaptado de Orellana, 1982; Figueiredo, 1990; Telford *et al.*, 1990; Lowrie, 2007; Cruz, 2008).

A profundidade de penetração de um campo eletromagnético gerado na superfície do terreno depende da frequência desse campo, do afastamento entre bobines recetora e transmissora e

da condutividade do meio através do qual o campo se propaga (Correia *et al.*, 2008), uma vez que os campos eletromagnéticos são atenuados durante a sua passagem pelo meio e a sua amplitude diminui exponencialmente com a profundidade (Parasnis, 1997; Kearey *et al.*, 2002). Ferreira (1992) indica que as ondas poderiam penetrar a qualquer profundidade se o terreno fosse perfeitamente resistivo, mas devido à condutividade das formações a energia é absorvida de um modo contínuo. Empiricamente, a profundidade efetiva de penetração do campo traduz a profundidade máxima a que o condutor pode chegar e ainda produzir uma anomalia eletromagnética reconhecível. Segundo Kearey *et al.* (2002) a profundidade máxima de investigação (z , em m) pode ser obtida a partir da equação [3.2], em que σ é a condutividade elétrica do meio (S/m) e f a frequência do campo eletromagnético (Hz).

$$z = \frac{100}{\sqrt{\sigma f}} \quad [3.2]$$

Consequentemente, para uma condutividade elétrica mais elevada e maior frequência de emissão do campo eletromagnético a profundidade de penetração desse campo será menor. No entanto, também para os métodos que usam baixas frequências é possível atingir profundidades superiores.

Os métodos eletromagnéticos podem dividir-se em métodos no domínio frequência (Frequency Domain Methods – FDEM) e métodos no domínio tempo (Time Domain Methods – TDEM). Nestes últimos as ondas eletromagnéticas são induzidas ao solo através de impulsos transientes ao contrário dos primeiros em que as ondas são contínuas. Neste trabalho aplicaram-se ambos os métodos, recorrendo à utilização dos condutímetro Geonics EM31 (GEONICS, 1984) e Geonics EM34 (GEONICS, 1990) e do equipamento TEM-FAST 48 (Applied Electromagnetic Research - AEMR, 2007a) para os métodos no domínio frequência e tempo, respetivamente.

3.1.1 - Método no domínio frequência

No método eletromagnético de frequência variável, as estruturas superficiais são detetadas através do campo secundário, gerado pelos corpos condutores na presença de um campo primário alternado (Correia *et al.*, 2010a). Como o campo secundário é muito pequeno relativamente ao primário e com o aumento de profundidade das estruturas que o originam a sua intensidade diminui, tornando-se difícil detetá-lo na presença do campo primário. Os condutímetro Geonics EM31 e EM34 funcionam desta forma, com deteção do campo secundário ainda na presença do campo primário e determinam a condutividade elétrica aparente do subsolo, sem haver contacto com a superfície do terreno.

O condutímetro EM31 (Figura 3.5) é constituído por uma unidade central de leitura e por duas bobinas, a bobina transmissora (Tx) e a bobina recetora (Rx), inseridas num varão de fibra em posição complanar e distanciadas de 3.66 m (GEONICS, 1984). O equipamento é transportado por um único operador, a uma altura de 1 m do solo, e é possível efetuar leituras pontuais e em contínuo, usando as bobinas na posição vertical ou horizontal a que correspondem, respetivamente, os dipolos horizontal (HD) e vertical (VD), como se representa na Figura 3.6. A bobina Tx gera correntes eletromagnéticas (numa frequência de 9800 Hz), cuja intensidade é proporcional à das correntes e da condutividade elétrica do terreno (Figura 3.7).

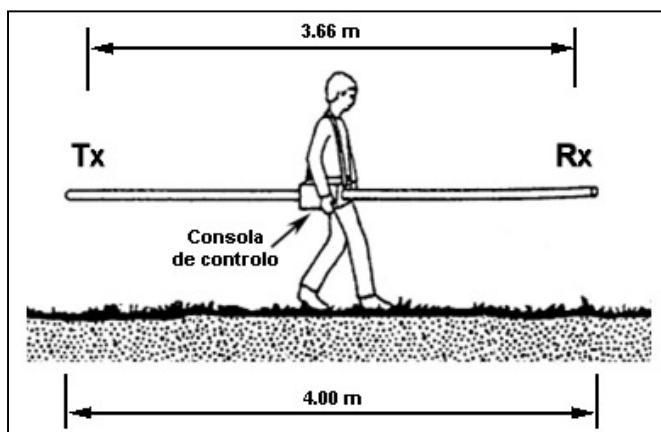


Figura 3.5 - Esquema do condutivímetro EM31 (adaptado de Ferreira, 1992 in Cruz, 2008).

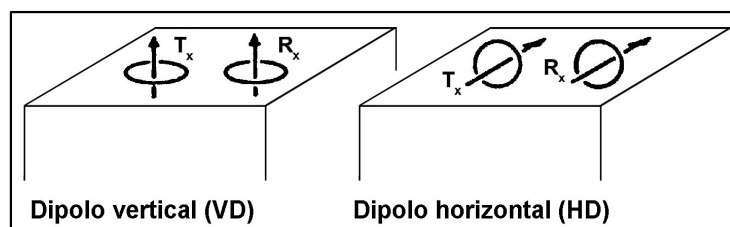


Figura 3.6 - Configurações geométricas das bobines (adaptado de McNeill, 1980b).

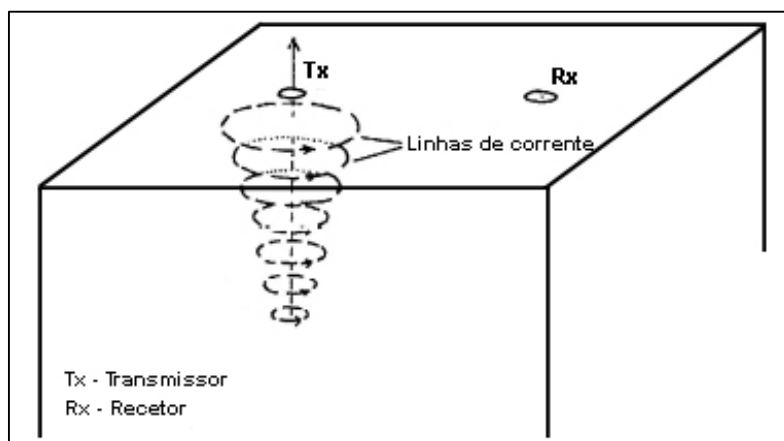


Figura 3.7 - Correntes geradas pela bobine Tx do condutivímetro EM31 (adaptado de GEONICS, 1984).

O condutivímetro EM34 (Figura 3.8) é constituído por duas bobines, a bobine transmissora (Tx) e a bobine recetora (Rx), unidas respetivamente a uma unidade transmissora e a uma unidade recetora através de cabos e ligadas entre elas através de um cabo com 10, 20 ou 40 m. A bobine transmissora, alimentada por uma bateria na mesma unidade, gera um campo eletromagnético primário que induz correntes elétricas nos corpos condutores existentes no meio. O campo eletromagnético secundário, resultante das correntes induzidas, tem uma intensidade que é função da magnitude e da frequência do campo primário, da condutividade elétrica do terreno e da distância entre bobines. A bobine recetora deteta os campos

eletromagnéticos e a unidade recetora mede o quociente entre o campo magnético secundário, relativo a um semi-espaço homogéneo de condutividade σ , e o campo magnético primário, gerado pela bobine transmissora (Figura 3.9). Os valores de condutividade elétrica aparente, lidos no mostrador da bobine recetora, referem-se ao local onde está colocada a bobine transmissora.

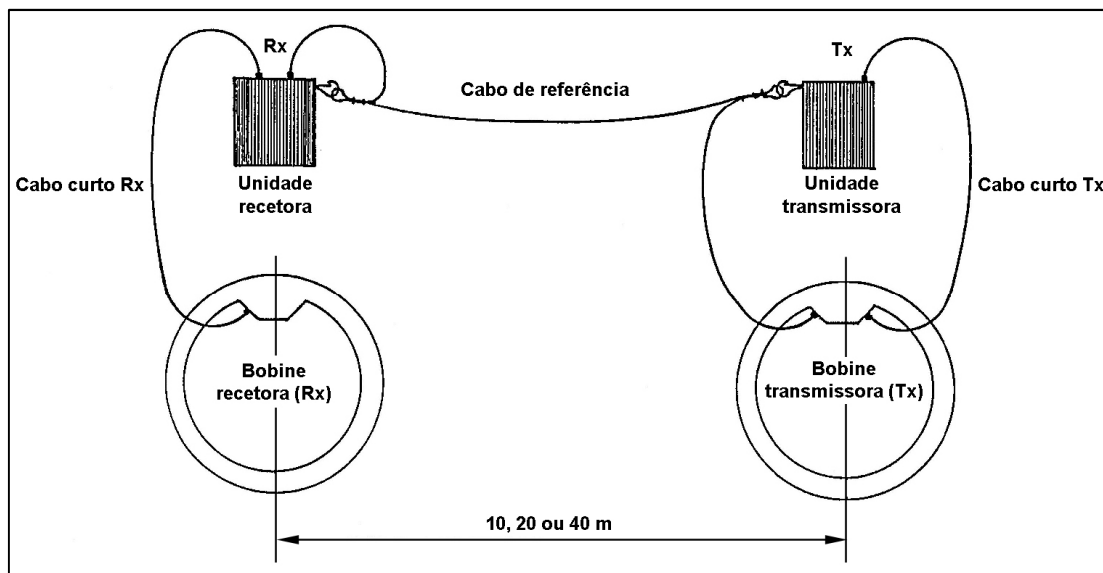


Figura 3.8 - Esquema do condutímetro EM34 (adaptado de GEONICS, 1990).

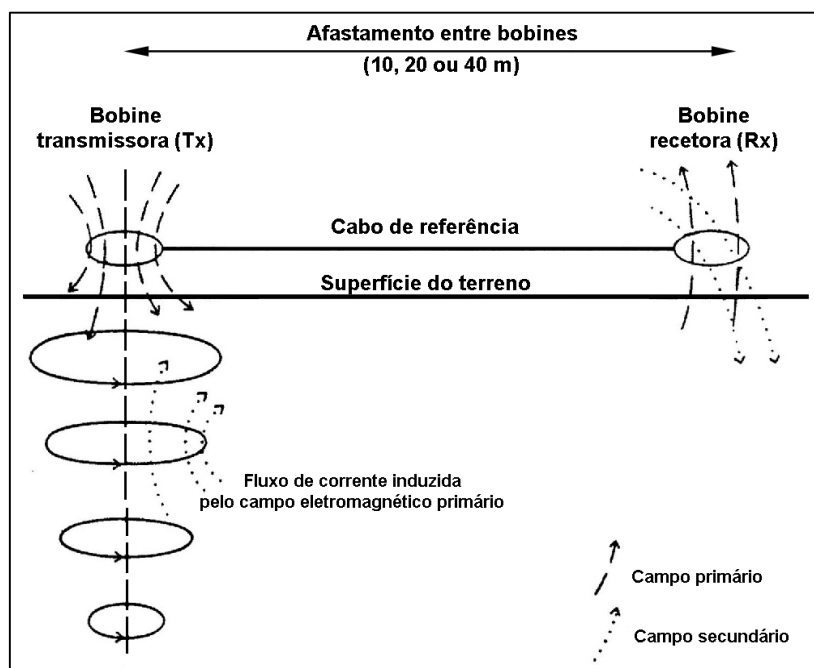


Figura 3.9 - Esquema do modo de funcionamento do condutímetro EM34 (adaptado de Ferreira, 1992).

O espaçamento entre bobines é medido eletronicamente e o operador do recetor apenas executa pequenas correções, por afastamento ou aproximação do transmissor, até o indicador de aferição apresentar a distância correta. Durante a aquisição de dados, as bobines devem estar o mais complanares possível, especialmente nas medições em dipolo vertical (Figura 3.6), uma vez que as bobines estão em posição horizontal e as leituras da condutividade elétrica aparente são mais sensíveis aos desalinhamentos entre as bobines (Ferreira, 1992).

A profundidade aparente de investigação dos condutivímetros EM31 e EM34 (Tabela 3.2) é condicionada pela frequência utilizada, pelo espaçamento entre bobines e a respetiva configuração geométrica (dipolo vertical ou dipolo horizontal), assim como pela condutividade elétrica do meio. A utilização destes dois condutivímetros numa campanha de prospeção geofísica, permite abranger um intervalo de profundidades de investigação, possibilitando a interpretação das características elétricas verticais do terreno (Cruz, 2008).

Tabela 3.2 - Parâmetros operacionais dos condutivímetros Geonics EM31 e EM34 (adaptado de Ogilvy *et al.*, 1991).

Condutivímetro	Espaçamento entre bobines (m)	Frequência (Hz)	Orientação dos dipolos	Profundidade aparente de investigação (m)
EM31	3.66	9800	HD	2.2
			VD	4.6
EM34	10	6400	HD	5.9
			VD	12.6
	20	1600	HV	11.8
			VD	25.3
	40	400	HD	23.5
			VD	50.6

HD - Dipolo Horizontal (bobines na posição vertical)

VD - Dipolo Vertical (bobines na posição horizontal)

3.1.2 - Método no domínio tempo

O método no domínio tempo ou método transiente eletromagnético (TDEM) foi desenvolvido com a intenção de ultrapassar as dificuldades de deteção do campo secundário afetas ao método do domínio frequência. Tal é alcançado quando esta deteção do campo secundário ocorre sem a presença do primário, o que se consegue desligando o campo primário. A medição da resposta transiente é equivalente a uma medição multifrequência, em banda larga da resposta do solo, como tal este método constitui uma forma conveniente de obter uma sondagem eletromagnética (Buselli *et al.*, 1990).

O método eletromagnético no domínio tempo é um método indutivo que recorre ao estudo do decaimento do campo eletromagnético gerado num meio condutor e cuja capacidade para detetar meios de baixa resistividade o torna num dos métodos preferidos, por exemplo, no mapeamento hidrogeológico, apresentando uma elevada resolução vertical. O método TDEM é altamente sensível a camadas de baixa resistividade (camadas condutoras) porque uma grande quantidade da corrente circula nestas camadas; a velocidade de difusão é elevada para camadas de elevada resistividade e baixa para camadas de baixa resistividade (Christiansen *et al.*, 2009).

A nomenclatura básica e os princípios do método estão sumariamente representados na Figura 3.10. A metodologia consiste em fazer passar uma corrente elétrica alterna numa bobine transmissora (Tx) colocada na superfície do terreno, de modo a gerar um campo eletromagnético primário ou campo estacionário, que é proporcional à área efetiva da bobine e à quantidade de corrente, mas que não induz correntes elétricas no subsolo. Caso a corrente em Tx seja subitamente interrompida (*Turn-off*), o campo primário também o é, mas não cai instantaneamente a zero, existindo um curto intervalo de tempo em que o campo eletromagnético passará do valor inicial a zero. Esta variação do campo eletromagnético gera correntes elétricas no subsolo condutor, que produzem um campo eletromagnético secundário que decairá de forma exponencial com o tempo e de acordo com a natureza do subsolo. A distribuição das correntes elétricas induzidas no subsolo assemelha-se a um sistema de correntes circulares, paralelas à superfície do terreno, que se difunde em profundidade ao longo do tempo (Figura 3.11).

O campo secundário, que corresponde à resposta transiente, é detetado pela bobine recetora (Rx) existente à superfície do terreno, com o registo dos dados em intervalos de tempo. A informação obtida nos instantes imediatamente após o corte da corrente (*early times*) é influenciada pelas estruturas mais superficiais do terreno, enquanto a obtida para tempos maiores (*later times*) é relativa às estruturas mais profundas. Parasnis (1997) refere que, qualitativamente, a resposta nos instantes iniciais (*early times*) do método transiente é análoga à resposta de alta-frequência do método de ondas contínuas, enquanto a resposta para tempos maiores (*later times*) corresponde à resposta em baixas frequências; esta equivalência deve ser encarada em termos gerais.

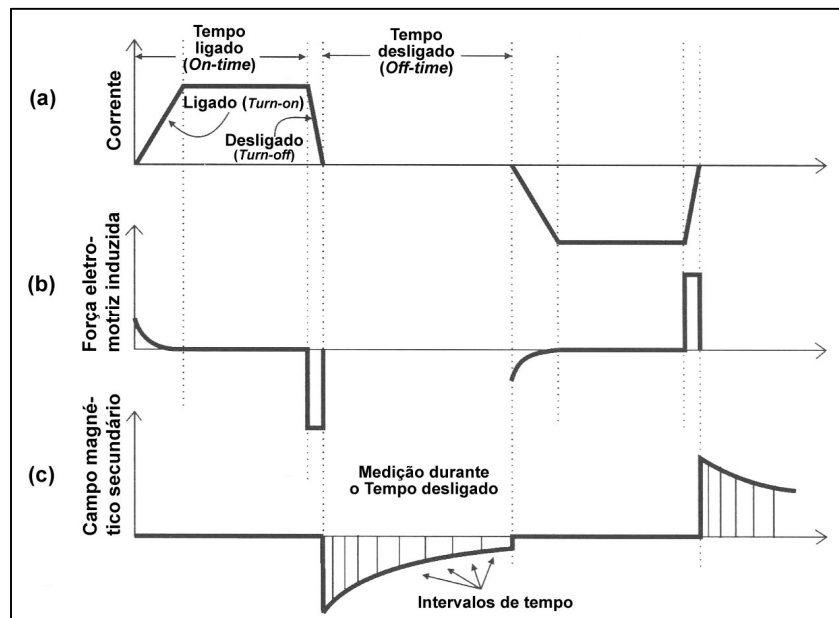


Figura 3.10 - Princípios básicos de medição do método TDEM: corrente em Tx (a); força eletromotriz induzida no solo (b); campo magnético secundário medido em Rx (c). Os gráficos (b) e (c) consideram a bobine recetora no centro da bobine transmissora (adaptado de McNeill, 1990; Christiansen *et al.*, 2009)).

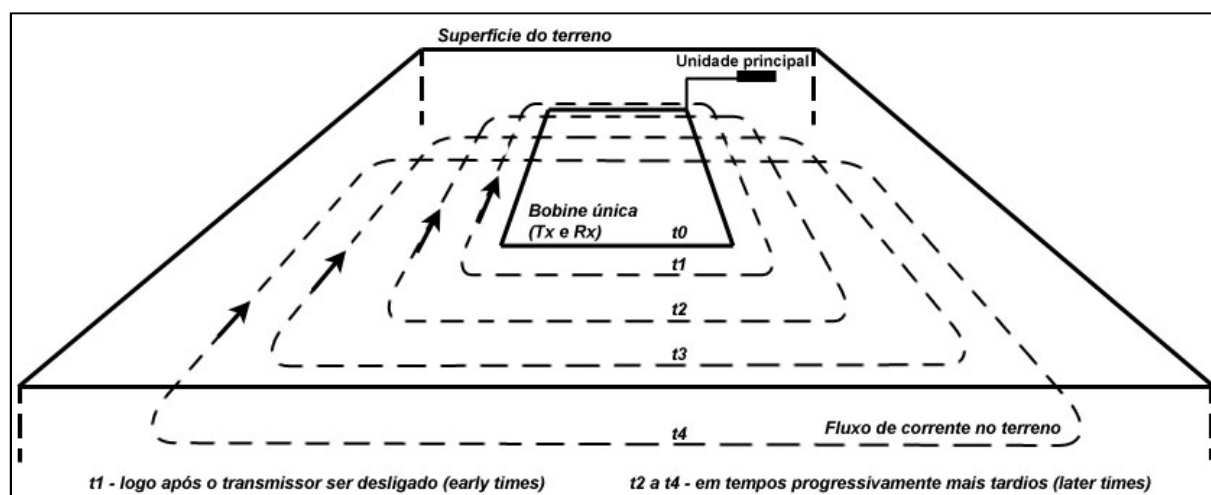


Figura 3.11 - Representação esquemática do fluxo de corrente no terreno com configuração de bobine única (adaptado de McNeill, 1994).

Nos meios com resistividades elevadas o campo secundário tende a zero rapidamente, ao contrário de meios com baixos valores de resistividade em que a resposta tenderá a zero de forma mais lenta. A análise da resposta do decaimento do campo magnético secundário ao longo do tempo, permite estimar valores de resistividade a várias profundidades de investigação e obter informação sobre a estrutura geológica do terreno. A leitura do campo secundário ocorre na ausência do campo primário, como tal os resultados obtidos são menos sensíveis aos erros da geometria Tx/Rx, não sendo necessário recorrer a ferramentas complexas para separar o sinal do campo primário e, finalmente, a separação Tx/Rx apresenta um efeito reduzido na profundidade de investigação alcançada (Goldman *et al.*, 1988; Kafri *et al.*, 1997; Sharma, 1997).

A aquisição de dados pode recorrer ao uso de várias configurações de bobines Tx e Rx (Figura 3.12), às quais correspondem diferentes sensibilidades, com possibilidade de colocar a bobine recetora dentro ou fora da bobine transmissora. No caso da bobine única, a própria bobine transmissora é usada como recetora após se desligar a corrente. Segundo Barsukov *et al.* (2007) a utilização da bobine única na tecnologia TEM-FAST, permite que se alcancem em simultâneo três objetivos: primeiro, são medidas variações temporais do fluxo magnético através da antena e os efeitos de irregularidades subsuperficiais na vizinhança da antena são integrados ao máximo; segundo, a eficiência do ensaio de campo aumenta significativamente uma vez que não é necessária a colocação de uma segunda antena ou a instalação de um recetor de indução; terceiro, o processo da medição transiente mostra uma série de peculiaridades úteis na realização das transformações.

As bobines geralmente têm a forma de quadrado com lados que variam de alguns centímetros a dezenas de metros; com o aumento da área de Tx, aumenta o momento da fonte e melhora o sinal em Rx, conseqüentemente é possível investigar estruturas mais profundas. Kafri *et al.* (1997) exemplificam, para o caso da bobine central, indicando que uma área da bobine transmissora de 50 m por 50 m pode alcançar profundidades de cerca de 100 m chegando a 1000 m de profundidade através do uso de bobines Tx com 500 m de lado.

Pode ser considerado uma desvantagem a necessidade de recolocar a bobine a cada sondagem e, dependendo da dimensão da mesma, as restrições na escolha do local.

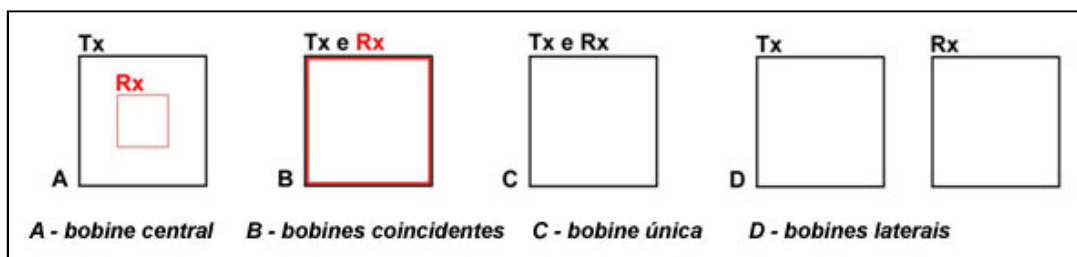


Figura 3.12 - Representação esquemática das configurações das bobinas transmissora (Tx) e recetora (Rx) para aquisição de dados TDEM (adaptado de Nabighian & Macnae, 1991; Correia *et al.*, 2010a).

Fitterman & Stewart (1986) e Christiansen *et al.* (2009) referem a necessidade de aumentar o momento transmissor para investigações a maior profundidade, algo que pode ser conseguido através do aumento da corrente transmissora, da área da bobine ou de ambos. Goldman *et al.* (1991) salientam que para alcançar maior profundidade de investigação apenas é necessário registar o sinal por um maior intervalo de tempo, após se desligar a bobine transmissora. Dentro de um grau razoável de aproximação, Christiansen *et al.* (2009) afirmam que uma medição transiente num determinado tempo é uma média das condutividades a partir da superfície até uma profundidade específica e não mais profundo.

A utilização do processo de *stacking*, isto é, a soma de sucessivos sinais no recetor, correspondentes a diferentes sinais do transmissor, permite a anulação do ruído aleatório e aumenta a relação sinal/ruído com possibilidade de detetar sinais fracos, associados às estruturas profundas (Santos, 2006). Caso o sinal seja maior que o ruído, não haverá dificuldade em medir o campo transiente, no entanto, o registo de grande quantidade de dados permite a redução do efeito do ruído instrumental e eletromagnético de fundo (Fitterman & Stewart, 1986) e os dados apresentam-se livres de ruído (McNeill, 1990).

O equipamento utilizado, TEM-FAST 48, é compacto, muito robusto, leve, de fácil transporte e permite uma operação eficiente em ambientes com algum ruído eletromagnético. O equipamento inclui uma unidade principal transmissora-recetora, os cabos da bobine e um pequeno computador (PDA – Personal Digital Assistant), como se visualiza na Figura 3.13.



Figura 3.13 - Equipamento TEM-FAST 48 (Applied Electromagnetic Research - AEMR, 2007a).

A unidade principal do TEM-FAST 48 (Figura 3.14) é constituída pelo transmissor, gerador de impulsos de corrente retangulares unipolar que passam através da antena transmissora (Figura

3.15); pelo recetor, que regista os sinais; pelo bloco de controlo e pela fonte de alimentação (normalmente bateria de 12 V, podendo ser incrementada por bateria externa de 12 ou 24 V).

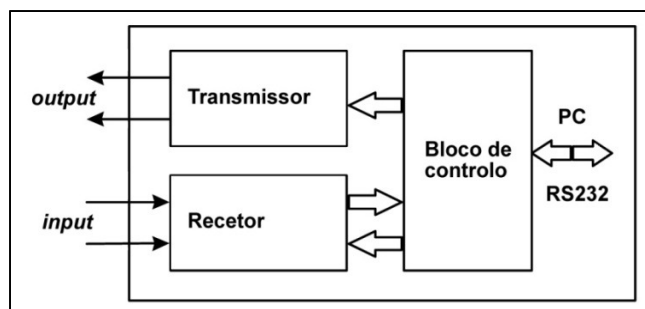


Figura 3.14 - Esquema da unidade principal do equipamento TEM-FAST 48 (adaptado de Applied Electromagnetic Research - AEMR, 2007a).

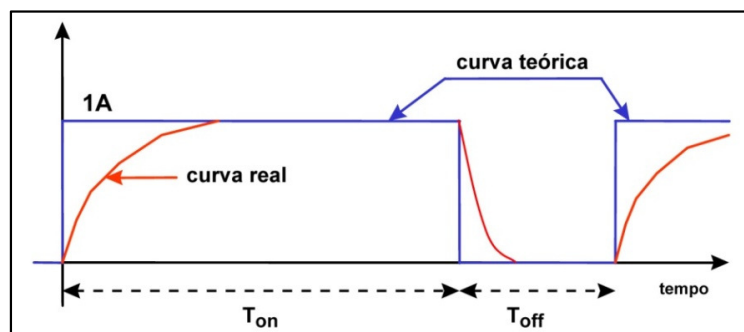


Figura 3.15 - Forma dos impulsos de corrente emitidos pelo transmissor do TEM-FAST 48 (adaptado de Applied Electromagnetic Research - AEMR, 2007a).

O equipamento possui um número máximo de canais de aquisição igual a 48, cujos intervalos de tempo variam em média entre 4.06 μ s a 15.36 ms. O pequeno intervalo de tempo de 4.06 μ s após desligar (*turn-off*) permite obter informação relativa às profundidades iniciais, quando se usam antenas de pequena dimensão (1 a 10 m de lado). A corrente transmitida pode ser de 1 a 4 A, no entanto normalmente não se alcança o valor máximo (Gonçalves, 2012). O tempo de *turn-off* para uma antena quadrada e corrente de 1 A é menos de 3 μ s (25 m \times 25 m), 8 μ s (50 m \times 50 m) e 20 μ s (100 m \times 100 m).

O recetor ou bloco de medições (Figura 3.16) é constituído por dispositivos de proteção contra voltagens elevadas (HVP), por um sistema multicanal de integração e armazenamento da informação analógica (DAS), por um *multiplexer* de canais (MX) e um conversor de analógico para digital (ADC).

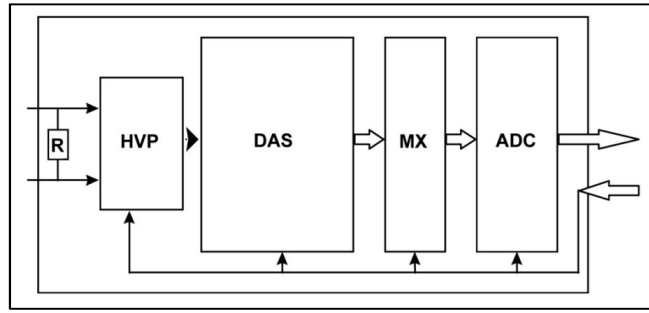


Figura 3.16 - Componentes do recetor do TEM-FAST 48 (adaptado de Applied Electromagnetic Research - AEMR, 2007a).

As medições do decaimento transiente são feitas de forma praticamente contínua sem “zonas mortas” (Applied Electromagnetic Research - AEMR, 2007a) e estão esquematicamente representadas na Figura 3.17. Em cada impulso de cada canal, o sinal é captado e armazenado, para ser analogicamente adicionado na próxima execução; isto é conseguido através do algoritmo interno do DAS. Posteriormente, o *multiplexer* canaliza os sinais *output* do DAS para o ADC que os digitaliza e transfere para o bloco de controlo e, conseqüentemente, a integração sofre um *reset* para a condição inicial.

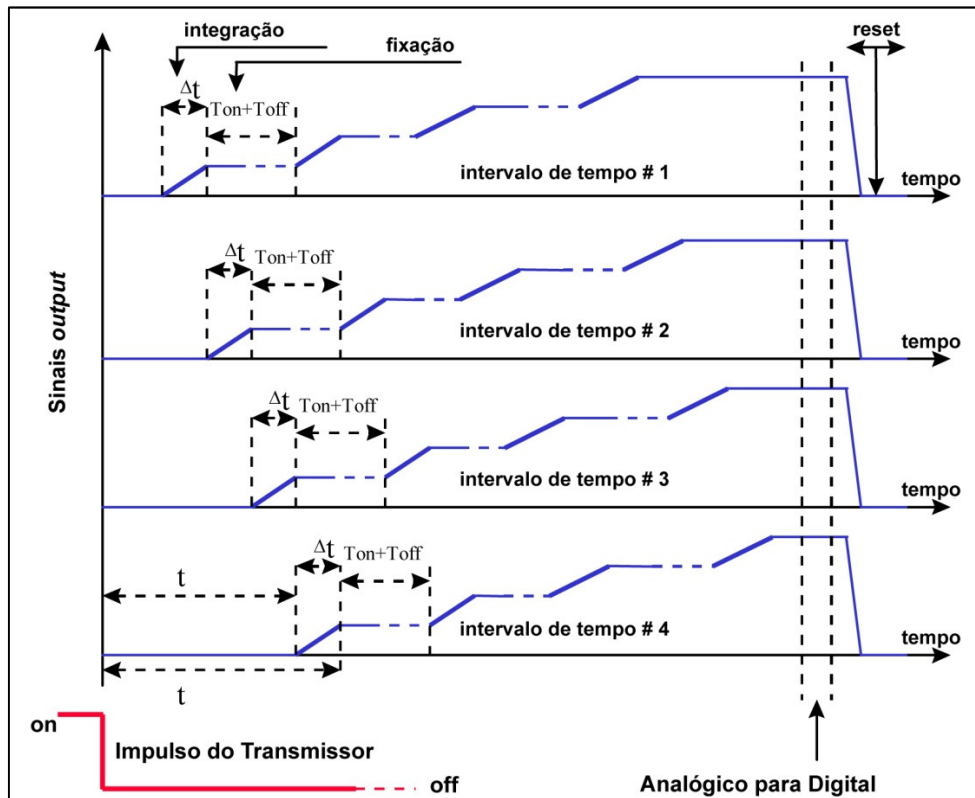


Figura 3.17 - Princípios de funcionamento do sistema multicanal DAS do TEM-FAST 48 (adaptado de Applied Electromagnetic Research - AEMR, 2007a).

O procedimento é automaticamente repetido várias vezes, de acordo com o número de *stacks* pré-definido (até um máximo de 20). Cada *stack* corresponde a 13 ciclos completos do algoritmo DAS. Normalmente, os canais mais elevados, que correspondem aos sinais mais tardios, são mais “ruidosos” quando comparados com os iniciais (Gonçalves, 2012).

Os dados recolhidos são gravados num PDA ligado à unidade principal do equipamento. Este pequeno computador também tem o programa (Applied Electromagnetic Research - AEMR, 2007a) que permite selecionar os parâmetros de entrada, que controlam a execução de cada sondagem.

As profundidades de investigação do TEM-FAST 48 situam-se num intervalo entre, cerca de, 5-10 m até algumas centenas de metros (Barsukov *et al.*, 2007).

3.2 - Campanhas de geofísica em Montouro

A cobertura sedimentar existente na zona impossibilita a observação de estruturas geológicas e dificulta a marcação de perfis com direção perpendicular às mesmas. Numa fase inicial, utilizando os condutímetro Geonics EM31 e EM34, os perfis foram executados ao longo de caminhos existentes e, sempre que possível, paralelos entre si de modo a permitir correlacionar zonas anómalas. Com os primeiros resultados optou-se pelo prolongamento de alguns dos perfis no sentido de verificar a continuidade de estruturas geológicas detetadas. Procedeu-se, igualmente, à recolha de dados com o TEM-FAST 48.

3.2.1 - Condutímetros Geonics EM31 e EM34

Com os condutímetros Geonics EM31 e EM34 processou-se a recolha de dados de condutividade elétrica aparente colocando as bobines recetora e transmissora espaçadas de 3.66 m para o EM31 e 10, 20 e 40 m para o EM34, como especificado na Tabela 3.2. As bobines foram posicionadas para obter os dipolos verticais (VD) e horizontais (HD), como representado na Figura 3.18 e como se visualiza na Figura 3.19 e na Figura 3.20.

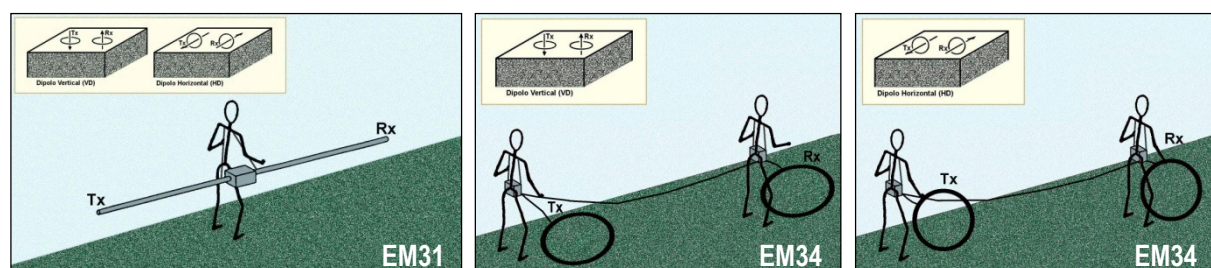


Figura 3.18 - Procedimento de campo para recolha de dados com os condutímetros Geonics EM31 e EM34 (Figueiredo, 2006).



(a)



(b)

Figura 3.19 - Registo de dados com o condutímetro Geonics EM31. Dipolos vertical (a) e horizontal (b).



(a)



(b)

Figura 3.20 - Registo de dados com o condutímetro Geonics EM34. Dipolos vertical (a) e horizontal (b).

No total efetuaram-se sete perfis de prospeção eletromagnética no domínio frequência, designados por Mont EM1 a Mont EM7, perfazendo um comprimento de 2180 m. O espaçamento entre leituras foi de 10 m e com a medição dos dipolos verticais (VD) e dipolos horizontais (HD), obtiveram-se oito valores de campo eletromagnético em cada ponto (dois com o EM31 e seis com o EM34), num total de 1764 leituras. A profundidade aparente de investigação é de 50.6 m. A Tabela 3.3 sintetiza esta informação. Quatro dos perfis têm direção aproximada SW-NE e os outros três com direção NW-SE, sendo estes dois conjuntos de perfis perpendiculares entre si (Figura 3.21).

Tabela 3.3 - Características dos perfis eletromagnéticos Mont EM1 a Mont EM7.

Perfis	Comprimento (m)	Número de leituras HD e VD	Orientação dos perfis
Mont EM1	390	304	SW-NE
Mont EM2	400	328	SW-NE
Mont EM3	390	300	SW-NE
Mont EM4	200	168	NW-SE
Mont EM5	200	168	NW-SE
Mont EM6	250	208	NW-SE
Mont EM7	350	288	SW-NE a \approx W-E
Total	2180	1764	

HD - Dipolo Horizontal (bobines na posição vertical)

VD - Dipolo Vertical (bobines na posição horizontal)

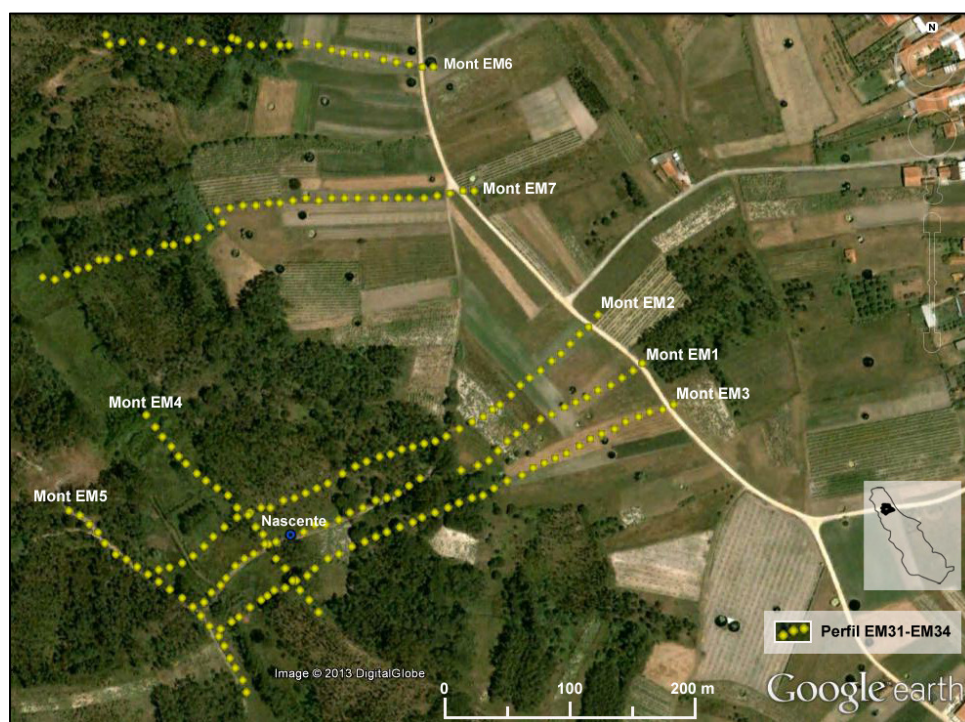


Figura 3.21 - Localização dos perfis de prospeção eletromagnética Mont EM1 a Mont EM7 (adaptado de Google Earth, 2013).

As coordenadas dos pontos de medida foram recolhidas através da utilização de um GPS (Global Positioning System), modelo SporTrak Pro da Magellan (Magellan Corporation, 2002), transferidas com o *software* GPS TrackMaker (Geo Studio Tecnologia, 2008) para ficheiros de dados georreferenciados, no sistema de coordenadas WGS 84 (WGS 1984 - UTM Fuso 29N).

Os dados de condutividade elétrica aparente (mS/m) recolhidos foram, inicialmente, tratados de forma qualitativa, com representação dos valores de campo e posterior interpretação. Cada perfil foi modelado usando os oito valores de campo eletromagnético medidos em cada ponto e recorrendo ao Método das Médias de VDs e HDs proposto por Figueiredo (2006), que se baseia nas médias aritméticas dos dados das leituras VD e HD (Tabela 3.4). Figueiredo (2006)

refere que o método é bastante expedito e apresenta bons resultados, apesar de estes serem qualitativos e a análise ser efetuada a partir de resultados de condutividade e profundidade aparentes, mas tem como vantagem permitir visualizar a distribuição dos valores da condutividade em profundidade e lateralmente.

Tabela 3.4 - Seleção dos valores de condutividade elétrica aparente medidos com o Geonics EM31 e EM34 utilizados para efetuar as secções VDs e HDs (Figueiredo, 2006).

#	Equipamento	Profundidade aparente (m)	Secção VDs	Secção HDs
1	HD3.66-EM31	2.2	HD3.66-EM31	HD3.66-EM31
2	VD3.66-EM31	4.6	VD3.66-EM31	VD3.66-EM31
3	HD10-EM34	5.9	HD10-EM34	HD10-EM34
4	VD10-EM34	12.6	VD10-EM34	-----
5	HD20-EM34	11.8	-----	HD20-EM34
6	VD20-EM34	25.3	VD20-EM34	-----
7	HD40-EM34	23.5	-----	HD40-EM34
8	VD40-EM34	50.6	VD40-EM34	VD40-EM34

A análise estatística dos valores de condutividade elétrica aparente segundo as secções HD e VD, bem como relativamente à média aritmética das leituras VD e HD está sintetizada na Tabela 3.5. No total das 1320 medidas, o valor mínimo é de 16 mS/m, o valor máximo de 148 a 150 mS/m e a média apresenta valores de 70, 64 e 67 mS/m nas leituras de HD, VD e (HD+VD)/2, respetivamente.

Tabela 3.5 - Dados estatísticos dos valores de condutividade elétrica aparente (mS/m) dos perfis eletromagnéticos Mont EM1 a Mont EM7.

Parâmetro estatístico	Condutividade elétrica aparente		
	HD	VD	(HD + VD)/2
Média (μ)	70	64	67
Valor Máximo (MAX)	148	150	148
Valor Mínimo (MIN)	16	16	16
Moda (M_0)	80	60	70
Mediana (P_{50})	71	62	68
Desvio padrão (σ)	23	23	22
Percentil P_{10}	40	39	40
Percentil P_{90}	96	90	93
Nº de medidas	1320		

Na Figura 3.22 é possível visualizar a distribuição dos valores das médias aritméticas de HD e VD, constatando-se que a maioria dos valores de condutividade elétrica aparente situam-se entre os 20 e 100 mS/m, estando cerca de 42 % entre 60 e 80 mS/m.

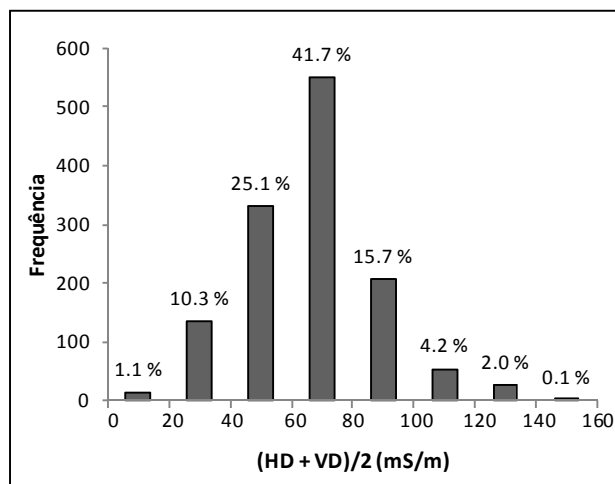


Figura 3.22 - Distribuição dos valores de condutividade elétrica aparente das médias aritméticas de HD e VD.

Cada *grid* inicial HD e VD foi elaborada, com base nos seis valores medidos, através do método de triangulação com interpolação linear; posteriormente, construíram-se as secções verticais ao longo dos perfis através do método das médias e recorrendo, em ambos os casos, à utilização do *software* Surfer (Golden Software Inc., 2009). Com o auxílio do *software* Rockworks (RockWare Inc., 2008) elaborou-se a projeção das pseudosecções dos perfis Mont EM1 a Mont EM7.

Na Figura 3.23 representa-se o modelo obtido para cada perfil. Nos perfis foram identificadas zonas anómalas de condutividade elétrica elevada, em que as zonas mais condutivas serão correspondentes a estruturas argilosas/falhas geológicas enquanto as zonas menos condutivas estarão relacionadas com estruturas arenosas. A Figura 3.24 tem a projeção da totalidade dos perfis possibilitando a visualização relacional entre eles.

O valor máximo de condutividade elétrica aparente registado, de 150 mS/m, ocorre no perfil Mont EM5 (Figura 3.23). De salientar as anomalias que poderão estar diretamente relacionadas com a presença de falhas profundas, como é o caso no perfil Mont EM1 entre os 40-50 m, aos 160 m, 260 m, 300 m e 360 m; no perfil Mont EM2 aos 50 m, 150 m, 210 m, 280 m e 320 m; no perfil Mont EM3 aos 190 m e 230 m; no perfil Mont EM4 aos cerca de 180 m; no perfil Mont EM5 aos 70 e 190 m; no perfil Mont EM6 aos 30 m e 110 m e o perfil Mont EM7 aos 230 m. As anomalias condutivas distribuem-se por uma área de dimensão significativa podendo esse facto ser explicado pela água mineralizada emergir por uma zona de falha e espalhar-se na camada superficial. A maioria das anomalias condutivas apresentam-se verticais, ocorrendo, também, inclinações que variam entre, aproximadamente, 70 a 80°.

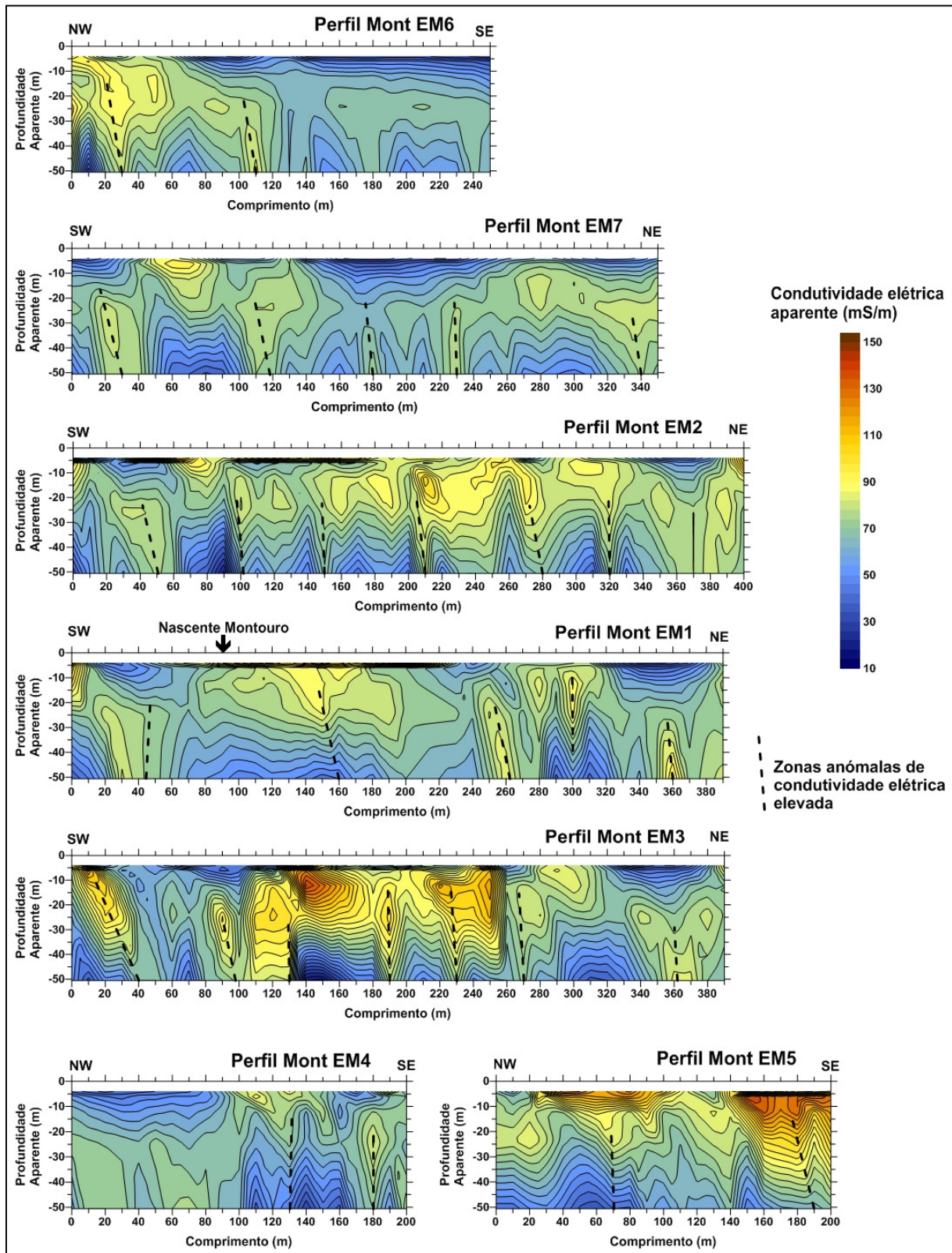


Figura 3.23 - Modelos dos perfis eletromagnéticos Mont EM1 a Mont EM7, com identificação das principais estruturas.

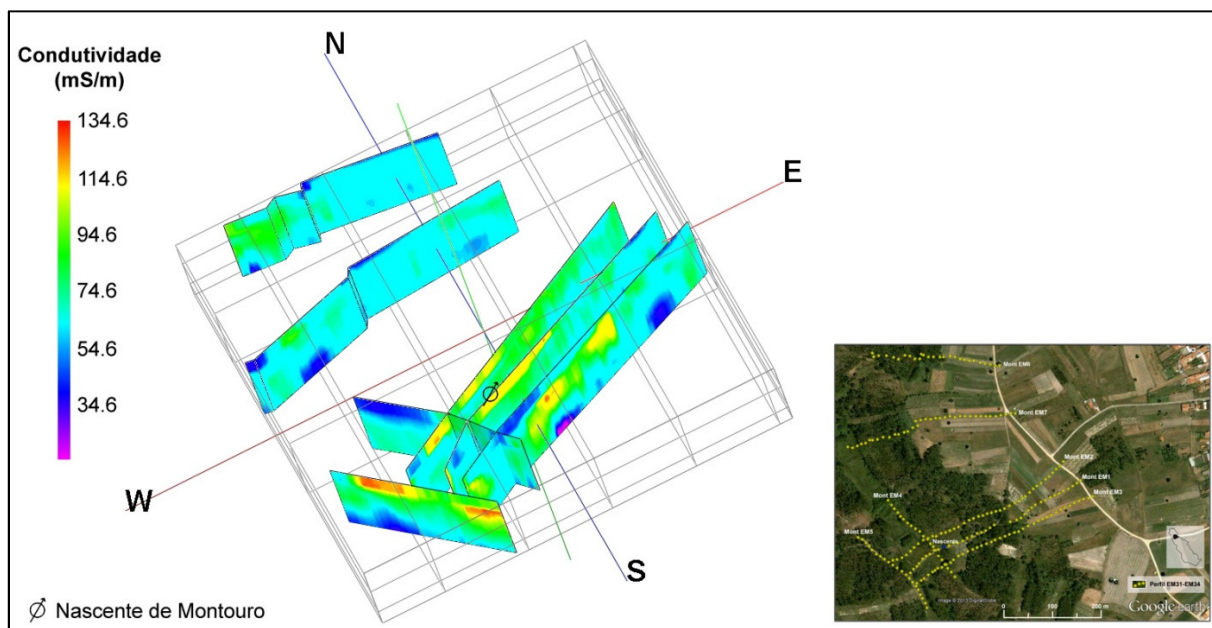


Figura 3.24 - Projeção dos perfis eletromagnéticos Mont EM1 a Mont EM7. É possível observar os valores elevados de condutividade nas proximidades da nascente.

3.2.2 - Campanha TEM-FAST 48

Numa fase inicial, para aferir a melhor relação sinal/ruído dos dados recolhidos e escolher a melhor configuração do sistema, realizaram-se algumas sondagens de teste com várias configurações e tamanhos de bobine e utilizaram-se diferentes parâmetros de aquisição dos dados.

A opção adotada foi pela configuração de bobine única, com a mesma bobine a funcionar como transmissora e recetora dos sinais, com um quadrado de 25 m de lado (Figura 3.25). A corrente transmitida foi de 1 A, o *stack* selecionado foi de 3 (correspondendo a 39 ciclos completos) e o tempo escolhido foi 5 (equivalente a 32 intervalos de tempo). Foram efetuadas 32 sondagens eletromagnéticas, designadas 1, 2, ..., 32, nos terrenos limítrofes à nascente de Montouro, entre outubro e novembro de 2009 (Figura 3.26).



Figura 3.25 - Pormenor do equipamento TEM-FAST 48 (a) e execução da sondagem (b).

As coordenadas dos pontos centrais da bobine foram recolhidas através da utilização de um GPS (Global Positioning System) da Garmin, modelo Dakota 20 (Garmin Ltd., 2009) e transferidas com o *software* GPS TrackMaker (Geo Studio Tecnologia, 2008).



Figura 3.26 - Localização das sondagens TEM-FAST 1 a 32 (adaptado de Google Earth, 2013).

O processamento das leituras registadas em cada uma das 32 sondagens é realizado através do *software* Tem-Researcher (Applied Electromagnetic Research - AEMR, 2007b), que acompanha o equipamento e que se baseia na solução do problema inverso das sondagens eletromagnéticas no domínio do tempo.

Inicialmente, obtêm-se curvas de resistividade elétrica aparente versus tempo (Figura 3.27 (a)) a partir das quais se realiza a inversão dos dados e elaboram modelos 1D (Figura 3.27 (b)). As curvas de resistividade aparente, da totalidade das sondagens, foram modeladas com erros médios de, cerca de, 1 %.

Os valores mais baixos de resistividade são da ordem dos 3 Ω .m e os valores mais elevados de, cerca de, 30 Ω .m. Estes resultados refletem conformidade com as características geológicas das formações existentes na área em estudo, concretamente das Argilas de Vagos, Grés de Verba e Grés de Oiã, sendo concordantes com os obtidos na região por Figueiredo (2001) para as mesmas formações.

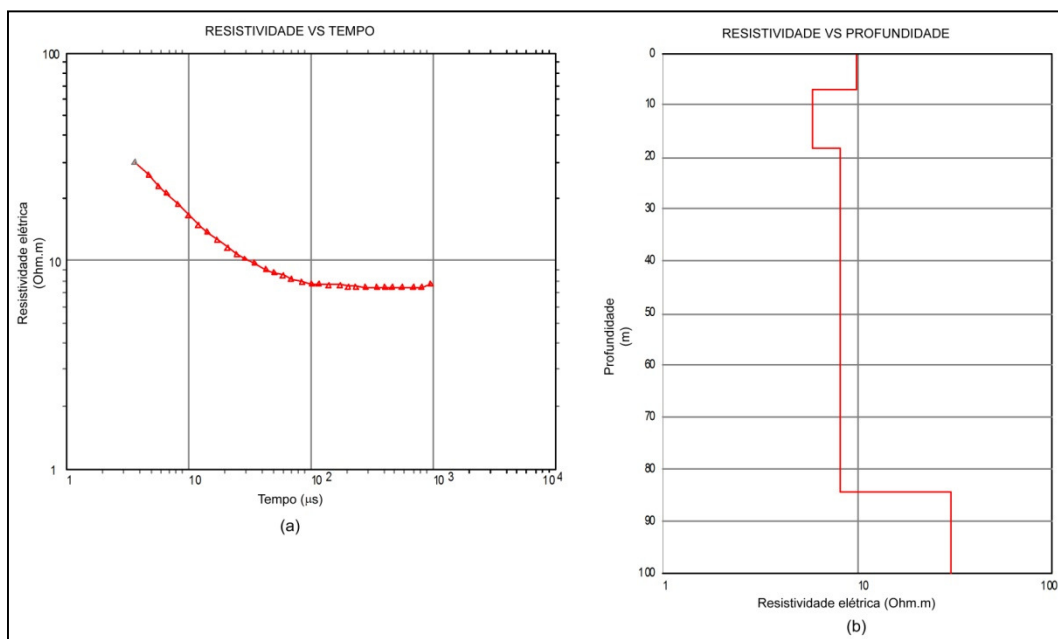


Figura 3.27 - Exemplo do processamento dos dados da sondagem 10. Curva de resistividade elétrica aparente (a) e resultado da inversão 1D da curva de resistividade elétrica aparente (b).

Posteriormente, foram seleccionadas algumas sondagens de forma a constituir alinhamentos designados como tomografia geoelectrica de superfície Mont TGS1, Mont TGS2, Mont TGS3 e Mont TGS4 (Figura 3.28). Através da interpolação dos seus modelos 1D obtiveram-se secções geoelectricas 2D ao longo do perfil criado, o que permite a visualização da distribuição da resistividade em profundidade (Figura 3.29).



Figura 3.28 - Localização das tomografias geoelectricas de superficie Mont TGS1 a Mont TGS4 (adaptado de Google Earth, 2013).

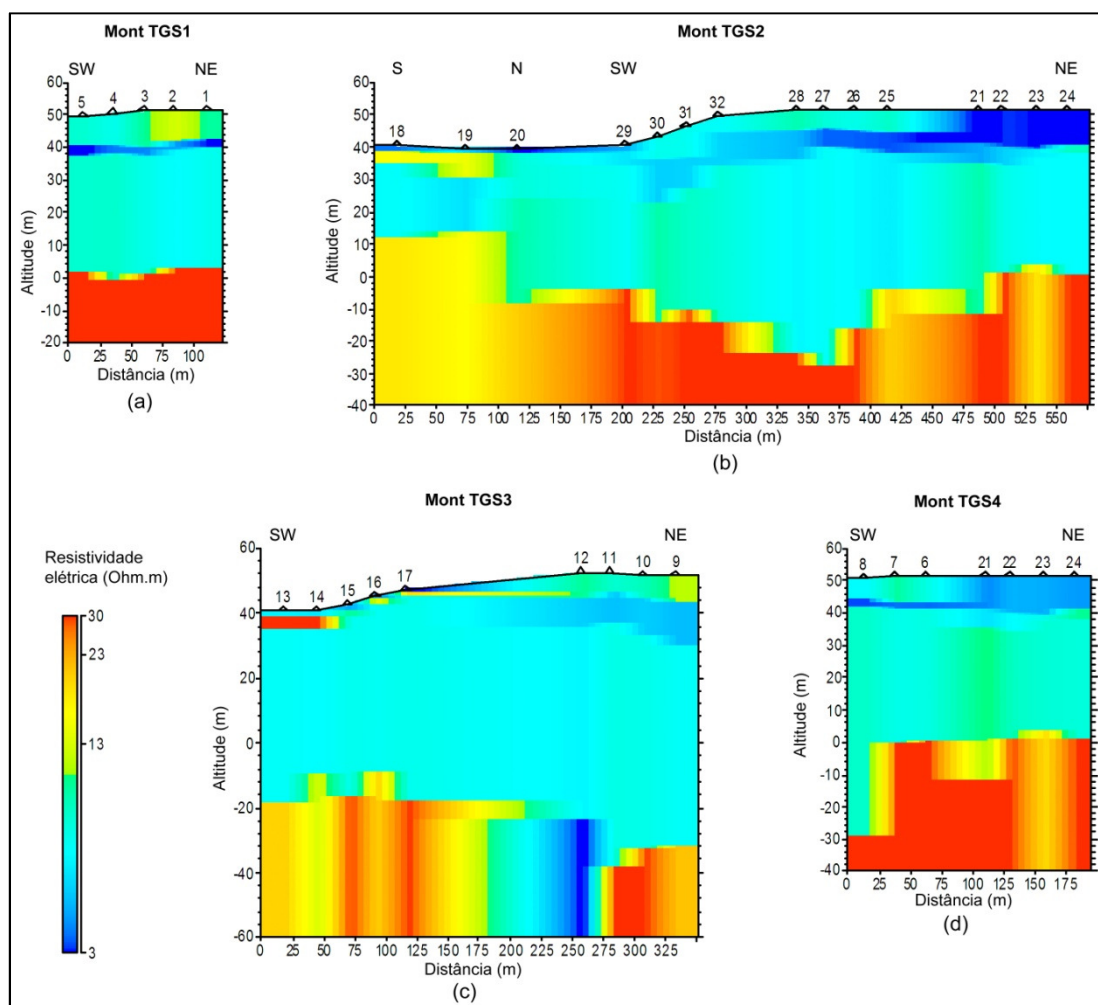


Figura 3.29 - Secções geoelectricas das tomografias Mont TGS1 (a), Mont TGS2 (b), Mont TGS3 (c) e Mont TGS4 (d) (adaptado de Correia *et al.*, 2010a). De salientar a baixa resistividade nas proximidades da nascente visível em Mont TGS2.

As zonas mais resistentes (ou menos condutoras) são apresentadas em tons de vermelho, enquanto as menos resistentes são apresentadas em tons de azul. A análise das secções geoelectricas revelou um modelo regular de três camadas, com estruturas simples ao longo de toda a área estudada.

Os resultados sugerem a presença de blocos resistentes a profundidades distintas, evidenciando a presença de discontinuidades (“degraus”), como é o caso, por exemplo, na Mont TGS2 entre as sondagens 21 e 22, entre a 25 e a 26 e nas sondagens 28 e 30. De referir a existência comum a todas as secções geoelectricas de uma superfície menos resistente, logo mais condutora, a pequena profundidade que possivelmente estará associada à presença da camada argilosa, correspondente às Argilas de Vagos. Na tomografia Mont TGS3 observa-se a SW e a pouca profundidade uma zona mais resistente.

3.2.3 - Conclusões

A análise conjunta dos resultados obtidos denotam correlação entre eles, sendo possível referir as seguintes conclusões:

- em Mont TGS3, na proximidade da sondagem 12, é visível a presença de uma falha importante que terá correspondência com a descontinuidade aos 230 m do perfil Mont EM7;
- nas sondagens 13 e 14, na Mont TGS3, existe um corpo resistivo a pouca profundidade também detetado a SW, próximo da superfície, no perfil Mont EM7;
- na Mont TGS3, nas sondagens 15 e 17 em profundidade aparecem zonas de elevada resistividade que se relacionam com as zonas pouco condutivas aos 60 m e 90 m do perfil Mont EM7;
- entre as sondagens 19 e 20, da Mont TGS2, ocorre uma descontinuidade visível aos cerca de 45 m do perfil Mont EM1;
- em Mont TGS1, temos uma zona mais resistiva junto à superfície na zona da sondagem 2 que está bem evidente entre os 340 m e 370 m no perfil Mont EM3;
- entre as sondagens 7 e 8, na Mont TGS4, a descontinuidade será o prolongamento da que ocorre entre as sondagens 25 e 26, da Mont TGS2, e nos perfis Mont EM1 aos 300 m e Mont EM2 aos 320 m.

Com base no que foi exposto, verifica-se que as diversas anomalias assinaladas têm correlação entre si, permitindo identificar alinhamentos estruturais, condutivos, bem definidos, representados na Figura 3.30. Os alinhamentos condutivos têm direção predominantemente NW-SE, estando um desses alinhamentos diretamente relacionado com a emergência de Montouro, o que indicará a origem profunda da água.

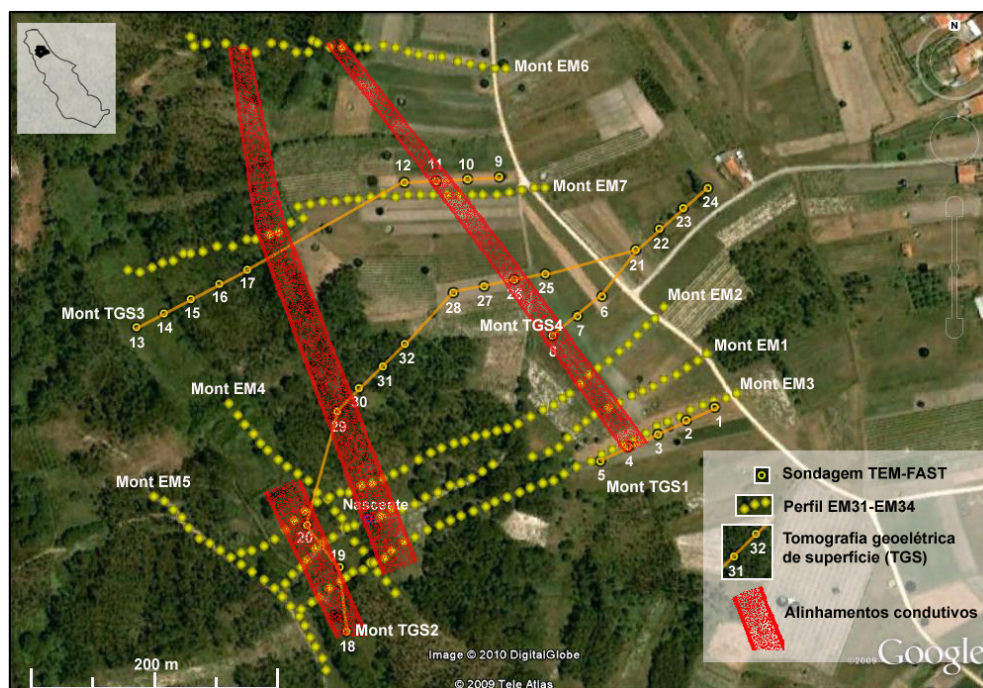


Figura 3.30 - Prospecção eletromagnética e alinhamentos estruturais condutivos (adaptado de Correia *et al.*, 2010a).

3.3 - Campanhas de geofísica em Ferverença

A formação jurássica, responsável pela exsurgência Olhos da Ferverença, encontra-se subjacente a uma cobertura de areias de duna, que inviabiliza a sua observação direta.

Heen (2002) efetuou uma campanha de prospeção geofísica na zona com o objetivo de identificar a existência de estruturas que possibilitassem criar um modelo estrutural da área (subcapítulo 2.6). Os métodos utilizados por este autor foram o método de resistividade, usando o dispositivo de medida de Wenner, e o método sísmico de refração. Na Figura 3.31 observa-se a representação espacial das 44 sondagens elétricas realizadas e dos cinco perfis sísmicos, bem como o seu enquadramento com a área da bacia hidrográfica de Ferverença.

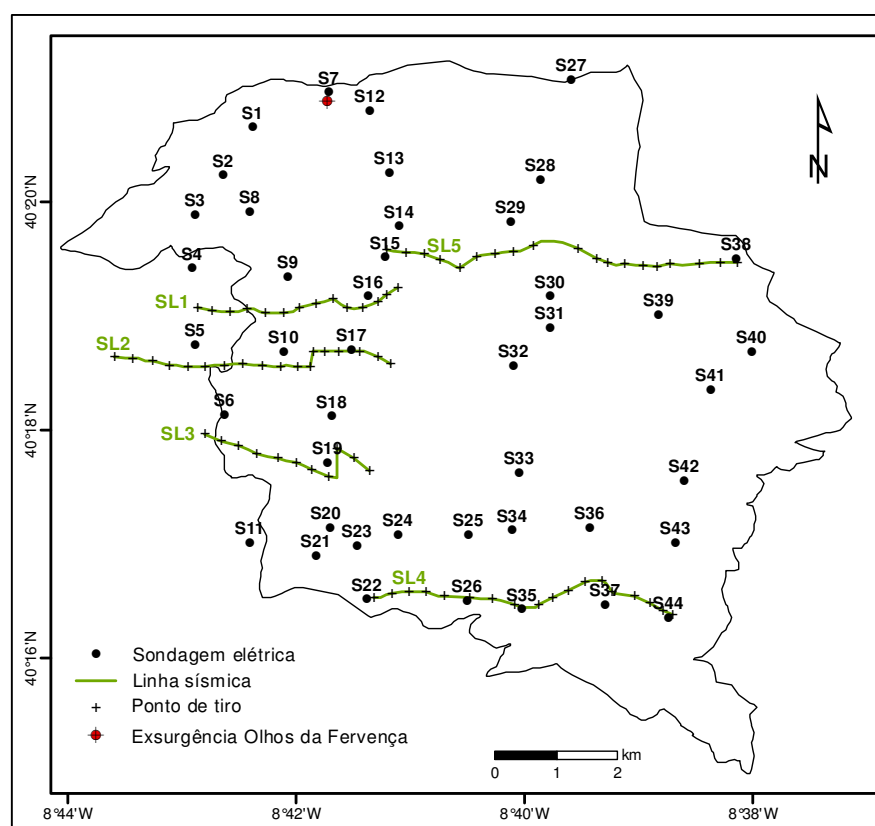


Figura 3.31 - Distribuição espacial das sondagens elétricas e dos perfis de refração sísmica (adaptado de Heen, 2002).

Para dar resposta a alguns problemas estruturais nas imediações da exsurgência, desenvolveu-se uma nova campanha de prospeção eletromagnética no domínio do tempo nos terrenos limítrofes da exsurgência Olhos da Ferverença, uma vez que na restante área já havia sido realizado um vasto trabalho de geofísica.

3.3.1 - Campanha TEM-FAST 48

Em janeiro de 2010, realizaram-se 24 sondagens eletromagnéticas com o equipamento TEM-FAST 48, designadas OFT01 a OFT24 (Figura 3.32). Foi utilizada a configuração de

bobine única, com uma antena com 25 m de lado (Figura 3.33). A corrente transmitida foi de 4 A, o *stack* selecionado foi de 3 (correspondendo a 39 ciclos completos) e o tempo escolhido foi 5 (equivalente a 32 intervalos de tempo).



Figura 3.32 - Localização das sondagens TEM-FAST OFT01 a OFT24 (adaptado de Google Earth, 2013).



(a)



(b)

Figura 3.33 - Execução de sondagens com o equipamento TEM-FAST 48 (a) e visualização da configuração da bobine (b).

Registaram-se as coordenadas dos pontos centrais da bobine recorrendo à utilização de um GPS (Global Positioning System) da Garmin, modelo Dakota 20 (Garmin Ltd., 2009) e, posteriormente, com o *software* GPS TrackMaker (Geo Studio Tecnologia, 2008) procedeu-se à respetiva transferência dos valores.

No processamento dos dados de campo, cada sondagem foi modelada individualmente, à semelhança do que foi feito com os dados de Montouro.

As curvas de resistividade aparente obtidas apresentam valores variáveis entre 10 Ω .m e 1000 Ω .m, modeladas com erros médios de, aproximadamente, 2 %. Exceção para as sondagens OFT13, OFT14 e OFT24 que apresentam erros significativos devido ao elevado ruído registado, consequência da proximidade de vedações metálicas, máquinas em funcionamento e linhas de média tensão, não tendo por isso sido consideradas na interpretação dos resultados.

Selecionaram-se as sondagens que permitem construir as tomografias geoeletricas de superfície TGS01 a TGS05 (Figura 3.34). Na Figura 3.35 apresenta-se a visualização das secções geoeletricas com a distribuição da resistividade elétrica em profundidade, sendo as zonas mais resistivas representadas em tons de vermelho e as menos resistivas em tons de azul.

A Figura 3.36 tem a projeção das secções geoeletricas das tomografias, realizada através do *software* Rockworks (RockWare Inc., 2008), possibilitando analisar a relação entre cada uma delas.

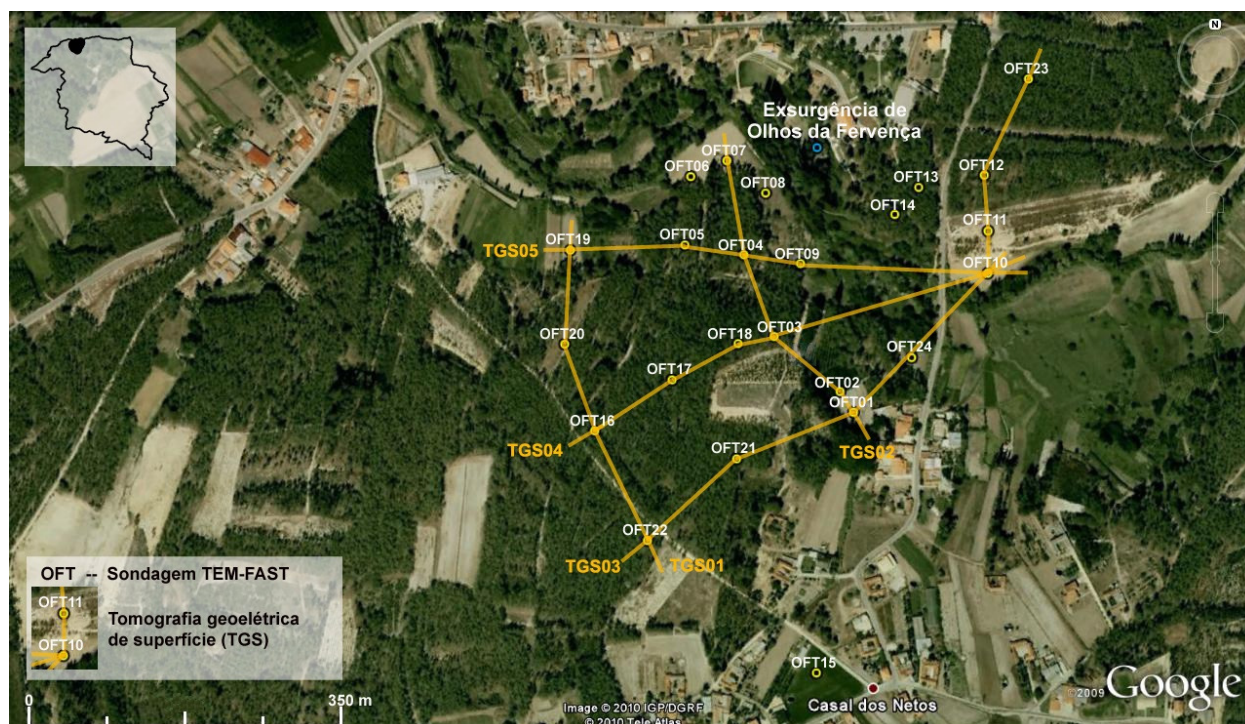


Figura 3.34 - Localização das tomografias geoeletricas de superfície TGS01 a TGS05 (adaptado de Google Earth, 2010).

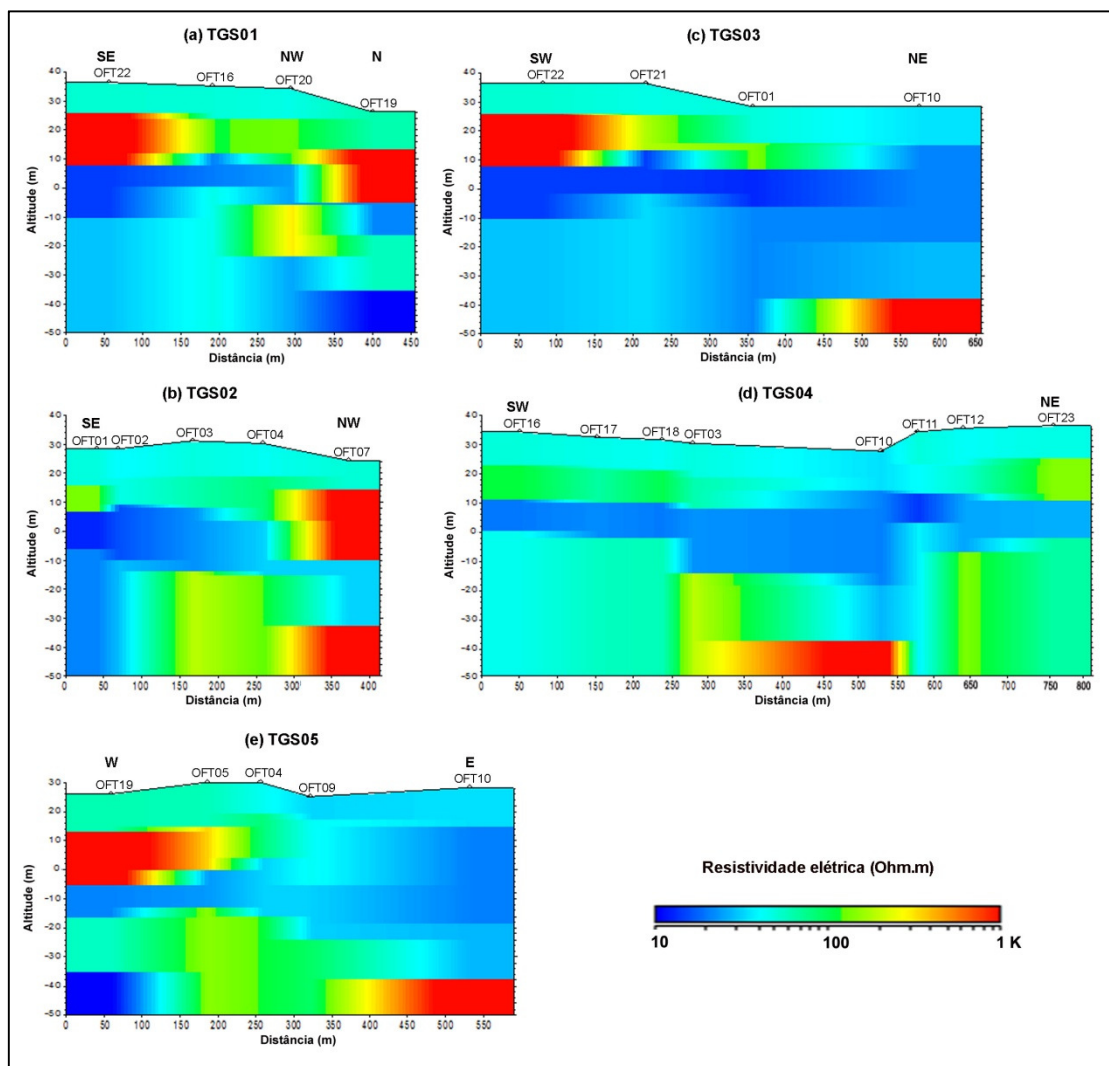


Figura 3.35 - Secções geoelectricas das tomografias TGS01 (a), TGS02 (b), TGS03 (c), TGS04 (d) TGS05 (e) (adaptado de Correia *et al.*, 2010b). É notória a transição entre blocos de resistividades muito distintas.

Os resultados sugerem a presença de blocos resistentes a pequena profundidade (cerca de 10 m) que, possivelmente, correspondem a calcários margosos (J_{ef}^1) que se sobrepõem aos calcários dolomíticos (J_{cd}^1), de maior condutividade e principal unidade aquífera responsável pela exsurgência Olhos da Ferverça (capítulo 4). Estes blocos resistentes podem ser observados em TGS01, TGS02, TGS03 e TGS05, nas sondagens OFT07, OFT19 e OFT22.

Para a mesma profundidade a resistividade varia lateralmente e em profundidade existem degraus resultantes dessas variações. A presença de blocos resistentes semelhantes entre si nas várias tomografias permite correlacioná-los (Figura 3.36) e estimar a localização das estruturas de fracturação e o seu desenvolvimento. Estas estruturas estão assinaladas na Figura 3.37 como “falha provável”.

Os resultados obtidos indicam alinhamentos com direcções concordantes com as do trabalho de Heen (2002), no entanto, acrescentam a pormenorização das estruturas nas imediações da exsurgência.

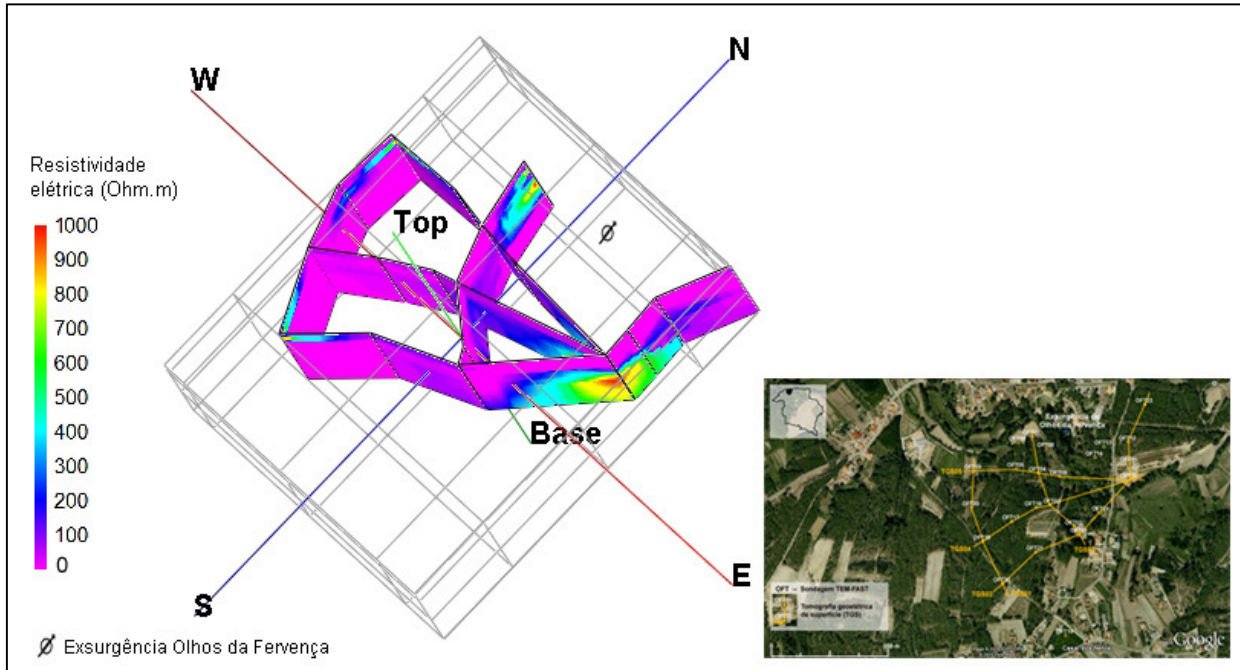


Figura 3.36 - Projeção das secções geoeletricas das tomografias TGS01 a TGS05, onde se visualiza a continuidade das zonas mais resistentes.

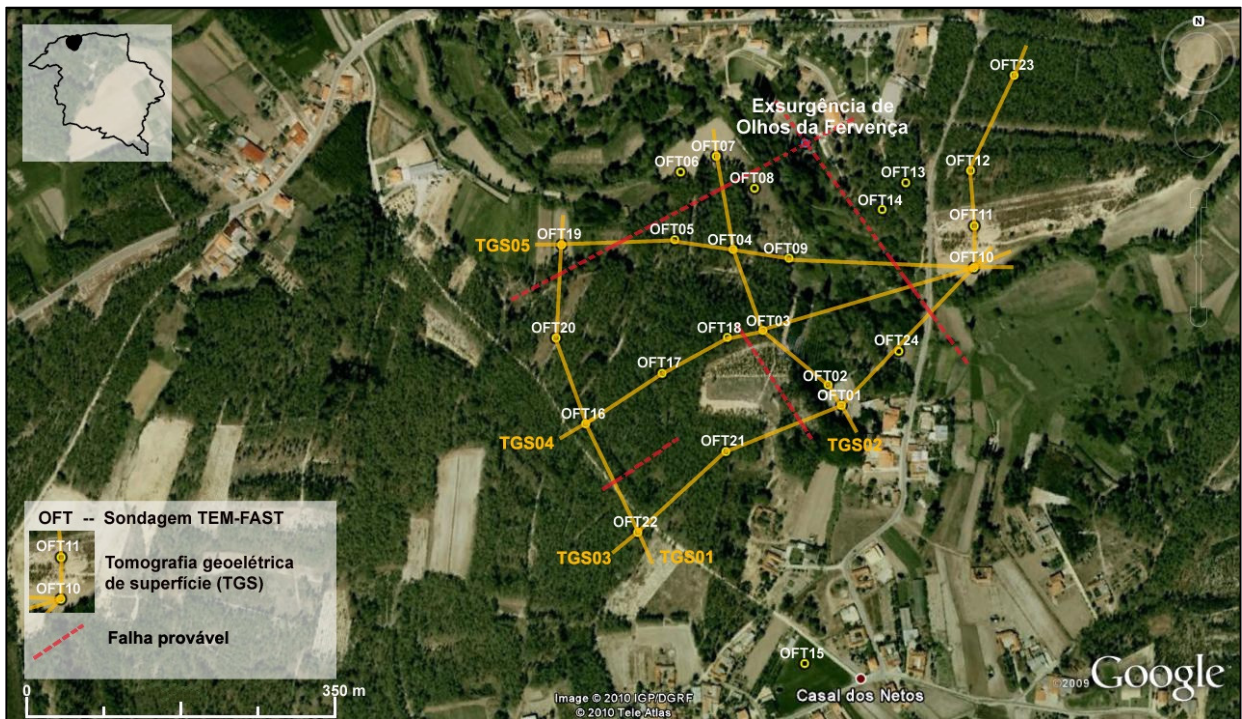


Figura 3.37 - Marcação das estruturas de fracturação (adaptado de Correia *et al.*, 2010b), inferidas pela interpretação das secções geoeletricas.

Capítulo 4 - Hidrogeologia

As características geológicas dos terrenos que preenchem uma bacia hidrográfica constituem o principal fator condicionante de circulação e armazenamento hídricos subterrâneos, ou seja, a Geologia é o mais importante na consideração de unidades hidrogeológicas e na definição de formações aquíferas, boas ou pobres, aquíferos, aquíferos, etc. (Almeida *et al.*, 1999).

No início deste capítulo descrevem-se as unidades hidrogeológicas e aquíferas presentes nas áreas em estudo, bem como a definição das suas propriedades hidráulicas. Seguidamente, é feita referência às campanhas de inventariação de pontos de água e de medição dos níveis piezométricos que possibilitaram a elaboração de mapas piezométricos. Por fim, é apresentada a interpretação dos processos e volumes de recarga e descarga aquíferas, assim como do escoamento subterrâneo nos locais de estudo, com a elaboração do respetivo modelo hidrogeológico conceptual.

4.1 - Unidades hidrogeológicas

A área da microbacia hidrográfica de Montouro e da bacia hidrográfica de Fervença, como anteriormente referido no capítulo 2, está localizada na bacia hidrográfica do rio Vouga, a qual segundo Ribeiro & Gamito (2012), do ponto de vista da produtividade hídrica, apresenta formações geológicas que podem ser agrupadas em:

- muito produtivas (calcários do Jurássico inferior e médio);
- produtividade média (formações carbonatadas e detríticas do Cretácico, formações detríticas do Miocénico e Plio-Quaternário);
- pouco produtivas (arenitos do Jurássico superior e as formações margosas do Jurássico inferior).

As bacias hidrográficas estão localizadas na Unidade hidrogeológica da Orla Mesocenozóica Ocidental ou Orla Ocidental (Figura 4.1). Esta Unidade inclui vinte e sete Sistemas aquíferos (Figura 4.2), constituídos por rochas e depósitos sedimentares muito diversos: (1) rochas detríticas terciárias e quaternárias como areias, areias de duna, terraços, aluviões, etc.; (2) arenitos e calcários cretácicos e (3) calcários jurássicos, originando dois tipos distintos de aquíferos, i.e., os cársicos e os porosos.

As estruturas cársicas, resultantes da dissolução carbonatada que é consequência da circulação hídrica subterrânea, evidenciam escoamentos rápidos, caudais muito dependentes da infiltração e coeficientes de armazenamento e transmissividade fortemente condicionados pela carsificação.

Os aquíferos porosos, multicamada, apresentam elevada produtividade, com exceção dos terraços plistocénicos com produtividade mais moderada.

Almeida *et al.* (1999; 2000b) referem que a organização sequencial dos sedimentos, individualiza verticalmente formações com comportamento hidrogeológico diverso, criando alternâncias, de aquíferos, aquíferos e aquíferos. Estas sequências constituem sistemas aquíferos multicamada, com drenância inter-camadas dependente do potencial hidráulico local, genericamente descendente nas zonas de recarga e ascendente nas zonas de descarga.

Salientam que em algumas estruturas evaporíticas estão preservados depósitos detríticos com elevado potencial aquífero e, como referido por Mendonça (1998), apresentam considerável importância local e regional como, por exemplo, na área das Matas Nacionais, a sul da Figueira da Foz, em Valado de Frades e em Caldas da Rainha.

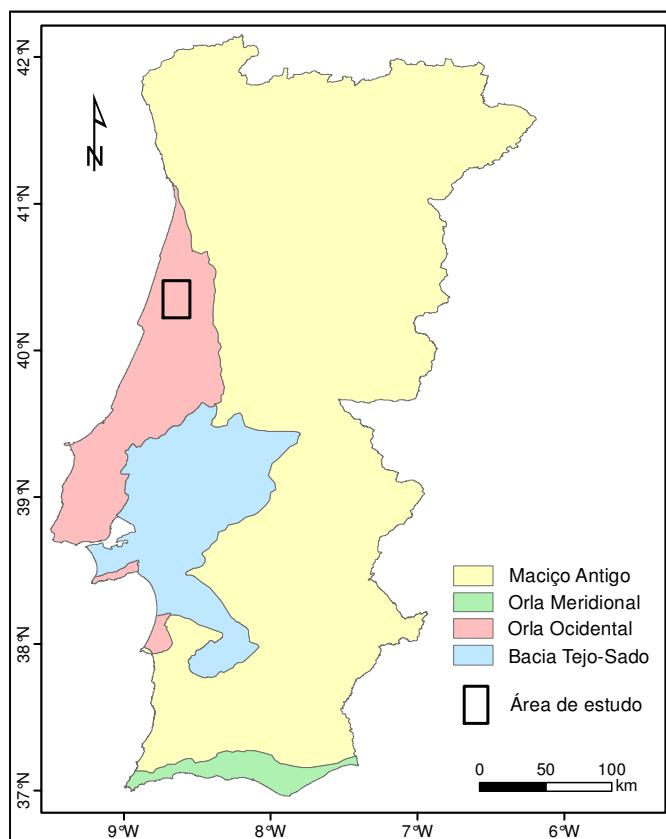


Figura 4.1 - Localização das áreas de estudo na Orla Mesocenozóica Ocidental (adaptado de SNIRH, 2014a).

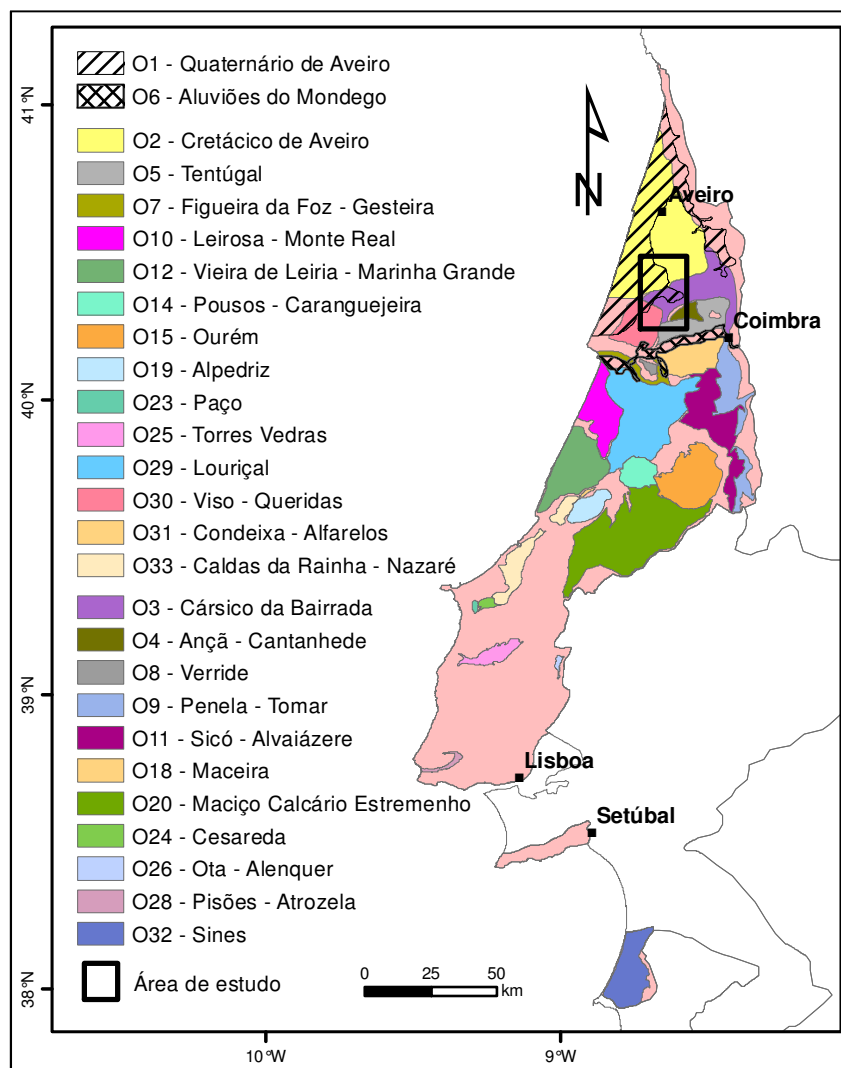


Figura 4.2 - Unidade hidrogeológica da Orla Ocidental com a representação dos Sistemas aquíferos e a localização da área de estudo (adaptado de SNIRH, 2014a).

A microbacia hidrográfica de Montouro está localizada no extremo SE do Sistema aquífero Cretácico de Aveiro (O2), como se visualiza na Figura 4.3.

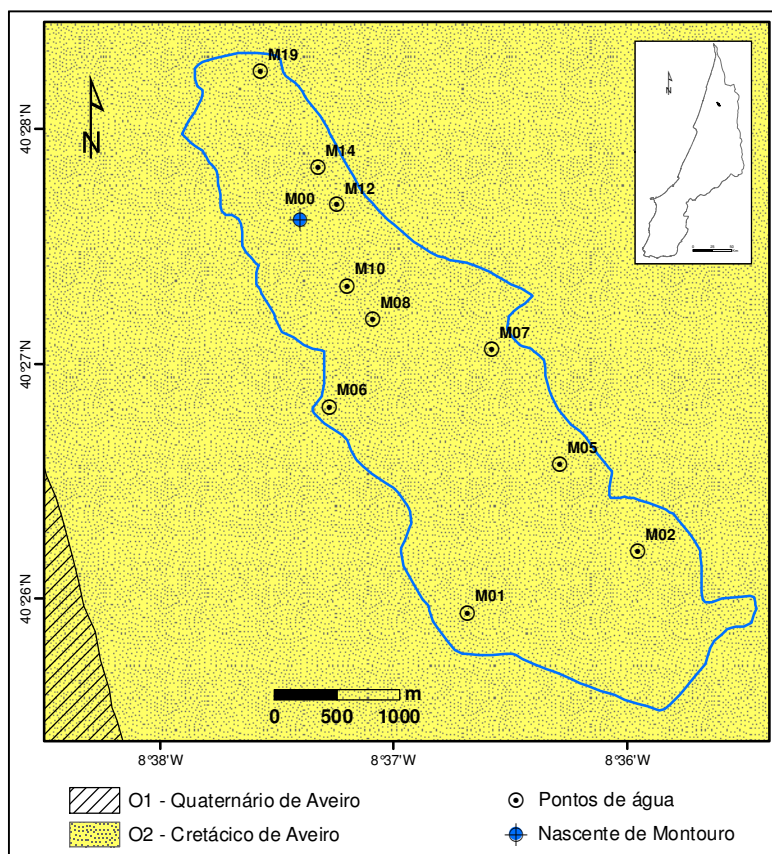


Figura 4.3 - Localização da MhM no Sistema aquífero Cretácico de Aveiro (adaptado de SNIRH, 2014a).

As formações que constituem o suporte do Sistema aquífero são de idade cretácica e de composição essencialmente detrítica e carbonatada (Almeida *et al.*, 2000d).

Segundo Marques da Silva (1990) o Sistema aquífero Cretácico de Aveiro caracteriza-se por incluir três aquíferos sobrepostos, cada um de carácter multicamada, nomeadamente:

- o aquífero principal e superior: o mais produtivo de todos, com suporte na última sequência do Grés Grosseiros Inferiores, na Formação Carbonatada, no Grés Micáceo e na parte inferior dos Grés Grosseiros Superiores;
- um aquífero subjacente: com águas mais mineralizadas, baixa permeabilidade e instalado em parte dos Grés Grosseiros Inferiores;
- o aquífero da base: tem por suporte a parte inferior dos Grés Grosseiros Inferiores, com águas ainda mais mineralizadas e menor permeabilidade.

Os Grés Grosseiros Inferiores são formados, na base, por níveis conglomeráticos, com matriz argilo-gresosa, onde predomina a caulinite, passando a arenitos grosseiros, com lentículas de calhaus de várias dimensões, com granulometria progressivamente menor para o topo, onde se torna mais quartzo-feldspática, de cores claras com passagens argilosas (Almeida *et al.*, 2000d). A parte superior da formação denota maiores transmissividades comparativamente à restante formação.

A formação carbonatada é considerada a camada-guia mais importante da coluna cretácica (Marques da Silva, 1992) apesar de ter pequena espessura. Caracteriza-se pela presença dominante de calcário, mais ou menos compacto, esbranquiçado a cinzento, margas escuras

argilosas, ou calco-arenitos, ou arenitos margo-calcários, revelando características hidrogeológicas variáveis mas que possibilitam a sua exploração.

O Grés Micáceo, camada aquífera com maior transmissividade, tem na base arenitos de grão fino a muito fino, micáceos, por vezes margosos, ficando para o topo mais grosseiros, com clastos de quartzo hialino ou fumado. A formação finaliza apresentando uma camada de argilas negras, micáceas, por vezes com nódulos de pirite.

A formação Grés Grosseiro Superior é constituída na base por Grés de Oiã (arenitos finos, com micas na base e intercalações argilosas, que superiormente passa a grés grosseiros, com alternâncias de níveis de maior granulometria e passagens argilosas, mas hidrogeologicamente é um aquífero) seguida de Grés de Verba (essencialmente argilosos, com passagens mais grosseiras, mas aspeto relativamente homogéneo). O elevado conteúdo de argila na unidade Grés de Verba reduz a sua transmissividade e aumenta o tempo de residência da água subterrânea, classificando a formação como aquífero confinado (Condesso de Melo & Marques da Silva, 2008).

O confinamento do Sistema aquífero advém da sobreposição de Arenitos e Argilas de Aveiro e Vagos. Onde não existe este teto argiloso apresenta propriedades freáticas. Esta unidade condiciona a recarga do aquífero, no entanto, devido à baixa permeabilidade, também o protege de possíveis contaminações. Hidrogeologicamente, é considerada um aquífero confinado.

Almeida *et al.* (2000d) referem que o modelo hidrogeológico admitido considera que a recarga ocorre nos locais de afloramento das unidades permeáveis cretácicas, ou onde estas se encontram sob terraços quaternários, com drenância vertical a partir da precipitação e infiltração, ou através de recarga induzida a partir do rio Vouga ou outra linha de água menor. Poderá existir transferência de água do Sistema aquífero Cársico da Bairrada para o Cretácico onde estes contactam.

Na Tabela 4.1 identifica-se as formações cartografadas na Carta geológica 16-C Vagos que correspondem a cada aquífero inserido no Sistema aquífero Cretácico de Aveiro (O2).

Tabela 4.1 - Unidades aquíferas constituintes do Sistema aquífero Cretácico de Aveiro (O2).

Unidades do Sistema aquífero Cretácico de Aveiro (O2)	Formações	Idade	Formações Carta 16-C Vagos	Unidade hidrogeológica
Principal	Grés Grosseiro Superior	Coniaciano-Santoniano	C ⁴ - Grés de Verba	Aquífero confinado
		Turoniano-Coniaciano	C ³⁻⁴ - Grés de Oiã	
	Grés Micáceo	Turoniano	C ³ - Grés de Furadouro	
	Formação Carbonatada	Cenomaniano	C ² - Calcários de Mamarrosa	
Intermédio	Grés Grosseiro Inferior (parte superior)	Aptiano/Albiano-Cenomaniano inferior	C ¹⁻² - Grés de Palhaça	Aquífero confinado
Base	Grés Grosseiro Inferior (parte inferior)			

A bacia hidrográfica de Ferveça ocupa domínios de diversos Sistemas aquíferos da Orla Ocidental, nomeadamente, Quaternário de Aveiro (O1), Tentúgal (O5), Viso - Queridas (O30) e Cárstico da Bairrada (O3), encontrando-se representados na Figura 4.4.

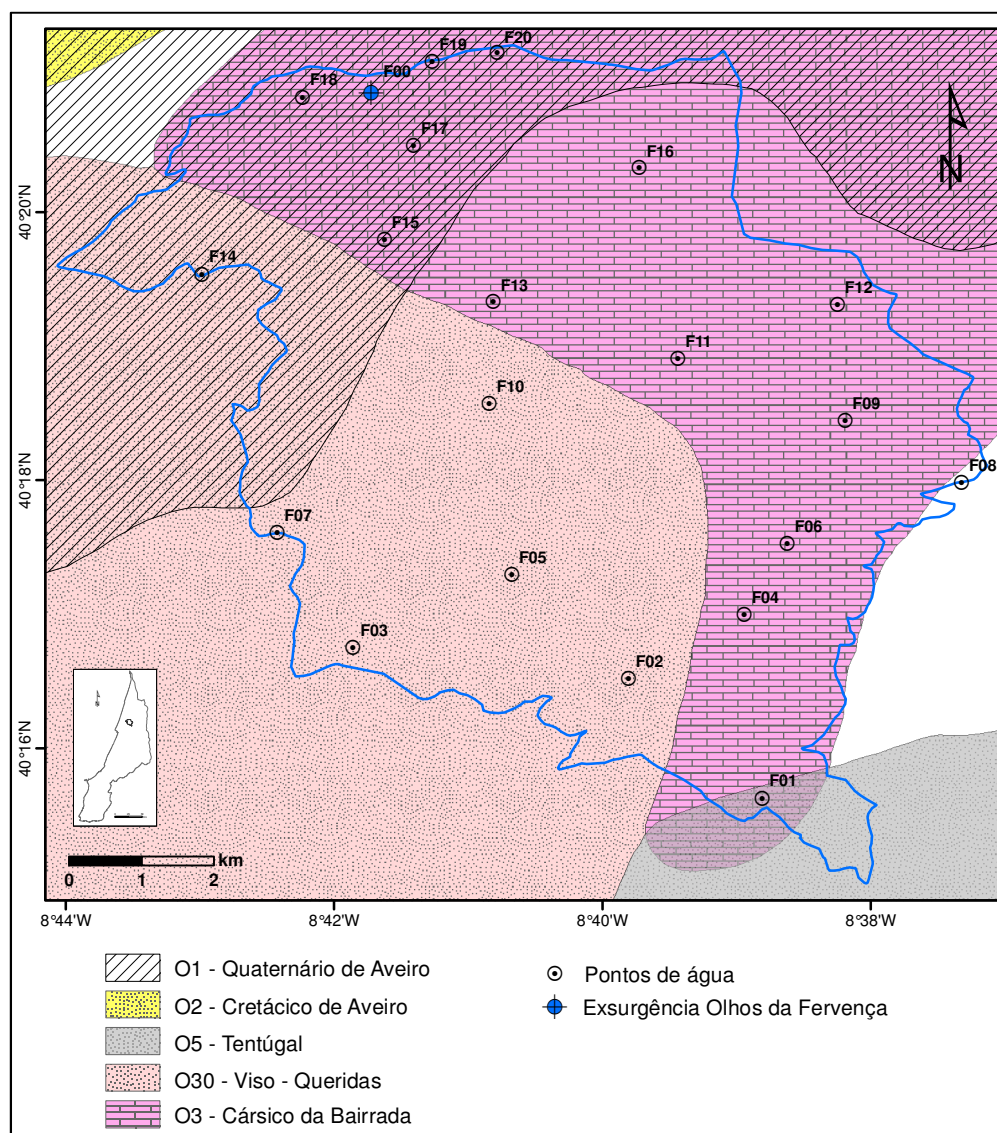


Figura 4.4 - Enquadramento da BhF nos Sistemas aquíferos regionais (adaptado de SNIRH, 2014a).

No Sistema aquífero Quaternário de Aveiro (O1), constituído por formações detríticas, distinguem-se três unidades aquíferas:

- um aquífero freático instalado em terraços fluviais e praias antigas pliocénicas;
- o aquífero confinado ou semiconfinado com suporte na formação de Base do Quaternário (Almeida *et al.*, 2000e);
- um aquífero freático associado ao manto dunar e aluviões modernos.

Os depósitos pliocénicos são maioritariamente constituídos por areia grossa, cascalho e seixo, com alguns terraços fluviais de granulometria mais fina, instalados nos leitos de linhas de água e delas diretamente dependentes. Ocorrem com pequena espessura (10 a 20 m), mas

em grande extensão de afloramento e, na região da Bairrada, assentam diretamente sobre o Jurássico. Apresentam fraca permeabilidade e a superfície piezométrica é coincidente com a topográfica, descarregando para os principais rios que existem na área.

A formação holocénica da Base do Quaternário apresenta uma sequência granodecrescente, muito grosseira na base, por vezes com clastos de xistos, granitos, grauvaques e liditos, passando superiormente a areões e areias cada vez mais finas e argilosas, e que termina em uma ou duas camadas de lodos orgânicos (Almeida *et al.*, 2000e) de baixa permeabilidade, que promove o confinamento e limita a recarga. Em grande extensão o aquífero é confinado e os níveis piezométricos situam-se acima desta camada de lodos ou mesmo da superfície do terreno (Almeida *et al.*, 2000e). Na direção oeste, com o desaparecimento da camada confinante, o aquífero passa a livre. A recarga na área semiconfinada, verifica-se por infiltração no aquífero superior e a partir de massas de águas superficiais, que possam estar hidráulicamente ligadas ao aquífero. A descarga efetua-se para o mar, ria de Aveiro ou outros rios ou para outros níveis aquíferos onde os gradientes hidráulicos são favoráveis (Condesso de Melo & Marques da Silva, 2008).

O manto dunar eólico, holocénico, de grande expressão litoral, na parte sul recobre o Cretácico e o Jurássico, bem como outras formações quaternárias anteriores. São areias finas, com reduzida fração silto-argilosa e muito permeáveis. O escoamento subterrâneo ocorre em direção ao mar, aos rios e aos aquíferos inferiores.

Este aquífero denota elevada vulnerabilidade a fenómenos de contaminação, bem como evidências de salinização de captações costeiras devido ao possível avanço da interface água doce/água salgada, ou devido a processos ainda mal esclarecidos, mas que provavelmente se relacionam com a drenância através das camadas lodosas contendo água salgada (Almeida *et al.*, 2000e).

Na Tabela 4.2 identifica-se as formações cartografadas na Carta geológica 19-A Cantanhede que correspondem a cada aquífero do Sistema aquífero Quaternário de Aveiro (O1).

Tabela 4.2 - Unidades aquíferas constituintes do Sistema aquífero Quaternário de Aveiro (O1).

Unidades do Sistema aquífero Quaternário de Aveiro (O1)	Formações	Idade	Formações Carta 19-A Cantanhede	Unidade hidrogeológica
Aquífero freático	Manto dunar e aluviões modernos	Holocénico	dd - Dunas	Aquífero freático
			A - Areias eólicas	
			Ae - Areias hidro-eólicas	
Base do Quaternário	Lodos orgânicos	Holocénico		Teto confinante
	Formação arenosa			Aquífero livre, confinado ou semi-confinado
	Formação grosseira			
Terraços fluviais e praias antigas	Depósitos pliocénicos	Pliocénico	Q ² - Areias de Cantanhede	Aquífero freático
			Q ¹ - Areias de Arazede	

O Sistema aquífero Tentúgal (O5) tem suporte em formações cretácicas do Aptiano ao Turoniano, sendo um aquífero multicamada constituído, da base para o topo, por Arenitos de Carrascal, Calcários de Tentúgal e Grés de Furadouro (Tabela 4.3). No geral, é poroso, com

camadas argilosas a separar as unidades aquíferas, sendo um Sistema aquífero livre a confinado, com recarga direta nos locais aflorantes ou por eventual descarga do Sistema aquífero Ançã-Cantanhede. As três unidades do Sistema aquífero, embora sobrepostas, são independentes sob o ponto de vista hidráulico e apresentam cargas hidráulicas diferentes e águas com características químicas distintas, como salienta Peixinho de Cristo (1998) citado em Almeida *et al.* (2000f).

Os Arenitos de Carrascal assentam discordantemente sobre o Jurássico, e são compostos por arenitos mais ou menos argilosos, finos a grosseiros, conglomeráticos, com cascalheiras e seixos e argilas, em geral arenosas (Almeida *et al.*, 2000f).

A transição para a unidade intermédia, Calcários de Tentúgal, ocorre através de elementos margosos e detriticos, de menor permeabilidade e comportamento de aquitardo. A formação é caracterizada pela presença de calcários, calcários margosos, grés calcários e margas.

Os Grés de Furadouro apresentam-se na base quartzareníticos, micáceos, finos a muito finos, que ficam mais grosseiros para o topo, ricos em areão e seixo fino de quartzo.

Tabela 4.3 - Unidades aquíferas constituintes do Sistema aquífero Tentúgal (O5).

Unidades do Sistema aquífero Tentúgal (O5)	Formações	Idade	Formações Carta 19-A Cantanhede	Unidade hidrogeológica
Topo	Formação arenítica, intercalada com argilas	Cenomaniano superior - Turoniano	C ³ - Grés de Furadouro	Aquífero livre a confinado
Intermédio	Formação carbonatada	Cenomaniano médio - Turoniano	C ²⁻³ - Calcários de Tentúgal	Aquitardo
Base	Formação arenítica, intercalada com argilas	Aptiano - Cenomaniano médio	C ¹⁻² - Arenitos de Carrascal	Aquífero livre a confinado

O Sistema aquífero Viso - Queridas (O30) localiza-se numa bacia sinclinal, no extremo oeste de duas estruturas anticlinais de direção NE-SW, a norte o anticlinal de Tocha-Mogofores e a sul o anticlinal de Cantanhede (Almeida *et al.*, 2000g). É predominantemente poroso, constituído por materiais detriticos lenticulares e separados por camadas argilosas que contribuem para a definição de aquífero multicamada. O Sistema engloba terrenos cretácicos e do Paleogénico e Miocénico indiferenciados (afloramentos dispersos de Arenitos Conglomeráticos de Queridas), parcialmente recoberto por terrenos plio-quadernários, de que são exemplo as areias eólicas.

Algumas das formações litostratigráficas do Cretácico (Arenitos de Carrascal, Calcários de Tentúgal, Grés de Furadouro) são comuns ao Sistema aquífero de Tentúgal, anteriormente referido, fazendo também parte do Sistema aquífero Viso - Queridas os Grés de Oiã (quartzarenitos e arcossarenitos, com matriz silto-argilosa) e Arenitos e Argilas de Viso (na base maioritariamente arenítico, evoluindo para o topo com granulometria inferior através de argilas vermelhas, hidrogeologicamente improdutivas). Os Arenitos de Carrascal afirmam-se como a unidade mais produtiva do Sistema.

O manto eólico tem importância significativa na recarga diferida do Sistema aquífero, para além da infiltração direta resultante do afloramento das unidades permeáveis.

A sequência das formações na área em estudo (Carta geológica 19-A Cantanhede) que suportam o Sistema aquífero multicamada Viso - Queridas (O30) encontra-se esquematizada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Unidades aquíferas constituintes do Sistema aquífero Viso - Queridas (O30).

Unidades do Sistema aquífero Viso - Queridas (O30)	Formações	Idade	Formações Carta 19-A Cantanhede	Unidade hidrogeológica
Topo	Formação argilosa	Maastrichtiano - Campaniano	C ⁵ - Arenitos e argilas de Viso	Improdutiva
	Formação arenítica			
Intermédio	Formação arenítica, silto-argilosa	Turoniano	C ³ - Grés de Oiã	Aquífero livre a confinado
	Formação arenítica, intercalada com argilas	Cenomaniano superior - Turoniano	C ³ - Grés de Furadouro	
	Formação carbonatada	Cenomaniano médio - Turoniano	C ²⁻³ - Calcários de Tentúgal	Aquitardo
Base	Formação arenítica, intercalada com argilas	Aptiano - Cenomaniano médio	C ¹⁻² - Arenitos de Carrascal	Aquífero livre a confinado

O Sistema aquífero Cársico da Bairrada (O3), tem como principais formações aquíferas, as seguintes unidades liásicas (Tabela 4.5):

- Camadas de Coimbra, constituída inferiormente por calcários compactos, tendo superiormente alternância de calcários com margas xistificadas, terminando com calcários compactos, ocorrendo em pequenos afloramentos dolomitizados próximo a Olhos da Fervença. A carsificação é responsável pela produtividade elevada desta unidade;
- Calcários Margosos de Lemed, com alternância de calcários argilosos, muito compactos com finos leitos de margas, tendo na carsificação a sua produtividade.

A camada Margas e calcários margosos de Vale das Fontes funciona como aquitardo, intercalado entre as unidades anteriores, sendo constituído por alternância de margas e calcários margosos. O Liásico termina com as Margas Calcárias de S. Gião, parcialmente cobertas pelas Areias de Arazede, formadas no geral por margas e calcários margosos, tendo como principal papel hidrogeológico constituírem o teto impermeável do sistema, conferindo-lhe características de confinamento, e impedem ou dificultam a entrada de contaminantes tendo importância na proteção natural do Jurássico produtivo (Almeida *et al.*, 2000c).

Almeida *et al.* (2000c) referem que o sistema apresenta uma heterogeneidade acentuada, como é típico de meios cársicos, e sendo um meio com elevada permeabilidade secundária a circulação da água faz-se através de canais, o que torna a percentagem de insucesso dos furos elevada (Lobo-Ferreira *et al.*, 1995b).

Peixinho de Cristo (1985) considera a existência de uma divisória de águas subterrâneas, verificando-se descarga no sector ocidental para oeste na direção da exurgência de Olhos da Fervença e para noroeste na direção do sistema cretácico e, no sector oriental para o rio Cértima (incluindo a exurgência de Arcos, perto de Anadia). As nascentes mais importantes

destes Sistemas aquíferos, por onde se dá em parte ou na totalidade a descarga natural, apresentam variações de caudal muito importantes, maiores nas descargas dos escoamentos locais e intermédios do que nos escoamentos longos e profundos que interessam a generalidade do sistema aquífero (Mendonça, 1998).

A alimentação do sistema é feita por recarga direta ou por drenância a partir de aquíferos freáticos sobrejacentes, sendo a recarga facilitada pela carsificação, bem como pela topografia, em geral relativamente aplanada.

Tabela 4.5 - Unidades aquíferas constituintes do Sistema aquífero Cársico da Bairrada (O3).

Unidades do Sistema aquífero Cársico da Bairrada (O3)	Formações	Idade	Formações Carta 19-A Cantanhede	Unidade hidrogeológica
Topo	Formação carbonatada	Domeriano médio - superior	J ¹ f - Calcários margosos de Lemede	Aquífero cársico
Intermédio		Carixiano - Domeriano inferior	J ¹ ef - Margas e calcários margosos de Vale das Fontes	Aquitardo
Base		Sinemuriano - Lotaringiano	J ¹ cd - Camadas de Coimbra	Aquífero cársico

4.1.1 - Parâmetros hidráulicos

Na caracterização de formações aquíferas é importante conhecer propriedades hidráulicas fundamentais como, por exemplo, a condutividade hidráulica (K), a transmissividade (T), o coeficiente de armazenamento (S) e a porosidade (n).

A condutividade hidráulica (K , em m/d) é um parâmetro que reflete a capacidade do aquífero em transmitir água, uma vez que estabelece a relação entre o escoamento específico ($\frac{Q}{A}$) e o gradiente hidráulico ($\frac{dh}{dl}$), de acordo com a equação [4.1], onde Q representa o caudal de descarga (m³/d) e A a área da secção transversal (m²). A condutividade hidráulica depende das propriedades do meio, nomeadamente do tamanho dos espaços vazios, e das propriedades do fluido, como a sua viscosidade ou peso específico.

$$K = - \frac{Q}{A \left(\frac{dh}{dl} \right)} \quad [4.1]$$

A transmissividade (T , em m²/d) pode ser obtida através do produto entre a condutividade hidráulica (K , em m/d) e a espessura ou espessura saturada do aquífero (b , em m), como traduzido na equação [4.2].

$$T = K \times b \quad [4.2]$$

O coeficiente de armazenamento (S) diz respeito à razão entre o volume de água cedido por uma coluna de aquífero de secção unitária, sob a ação de uma descida do nível piezométrico e o valor dessa descida (Almeida *et al.*, 2000a).

A porosidade (n) corresponde à percentagem de espaço vazio na matriz do aquífero; é a relação entre o volume de vazios (V_V , em m^3) e o volume total (V_T , em m^3), expresso pela equação [4.3]. A percentagem de volume total ocupada por poros interligados, através dos quais se pode estabelecer um fluxo de água, é designada porosidade eficaz (ne).

$$n = \frac{V_V}{V_T} \quad [4.3]$$

Na Tabela 4.6 apresentam-se alguns valores de referência de parâmetros hidráulicos para materiais sedimentares.

Tabela 4.6 - Valores de porosidade e condutividade hidráulica de alguns materiais sedimentares (Johnson & Morris, 1962; Davis, 1969; Croff *et al.*, 1985) citados em Freeze & Cherry (1979) e Domenico & Schwartz (1997).

Material		Porosidade	Condutividade hidráulica (m/s)
Não consolidados	Seixo	0.25 - 0.40	$3 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-2}$
	Areão	0.25 - 0.38	
	Areia grosseira	0.31 - 0.46	$9 \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-3}$
	Areia média		$9 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-4}$
	Areia fina	0.26 - 0.53	$2 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-4}$
	Silte	0.35 - 0.50	$1 \times 10^{-9} - 2 \times 10^{-5}$
	Argila	0.40 - 0.70	$1 \times 10^{-11} - 4.7 \times 10^{-9}$
Consolidados	Calcário, Dolomia	0 - 0.20	$1 \times 10^{-9} - 6 \times 10^{-6}$
	Calcário carsificado	0.05 - 0.50	$1 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-2}$
	Arenito	0.05 - 0.30	$3 \times 10^{-10} - 6 \times 10^{-6}$
	Siltito	0.21 - 0.41	$1 \times 10^{-11} - 1.4 \times 10^{-8}$
	Argilito	0 - 0.10	$1 \times 10^{-13} - 2 \times 10^{-9}$

Indicam-se, também, parâmetros hidráulicos para cada Sistema aquífero das áreas de estudo, obtidos a partir da consulta bibliográfica.

Peixinho de Cristo (1985) refere que o Sistema aquífero Quaternário de Aveiro, considerado no seu todo, apresenta valores de condutividade hidráulica média da ordem de 15 a 20 m/d, a que correspondem valores de transmissividade média de 250 a 600 m^2/d . Relativamente ao coeficiente de armazenamento este autor indica para o aquífero semi-confinado um valor de 10^{-3} a 6×10^{-4} enquanto, por sua vez, Almeida *et al.* (2000e) referem valores de 2×10^{-2} . Condesso de Melo *et al.* (2002) e Condesso de Melo & Marques da Silva (2008) determinaram condutividades hidráulicas variáveis entre 5 e 30 m/d. A Tabela 4.7 resume esta informação.

Tabela 4.7 - Parâmetros hidráulicos das formações do Sistema aquífero Quaternário de Aveiro (dados disponíveis em Peixinho de Cristo, 1985; Almeida *et al.*, 2000e; Condeso de Melo *et al.*, 2002).

Sistema aquífero Quaternário de Aveiro (O1)		Unidade hidrogeológica	Condutividade hidráulica (m/d)	Transmissividade (m ² /d)	Coefficiente de armazenamento
Aquífero freático	Manto dunar e aluviões modernos	Aquífero freático	20 - 30	250 - 600	2×10^{-2}
Base do Quaternário	Lodos orgânicos	Teto confinante			
	Formação arenosa	Aquífero livre, confinado ou semi-confinado	10 - 20		
	Formação grosseira				
Terraços fluviais e praias antigas	Depósitos pliocénicos	Aquífero freático	5 - 10		

O Sistema aquífero Cretácico de Aveiro apresenta propriedades hidráulicas variáveis (Ribeiro, 2012), devido à heterogeneidade espacial e vertical das formações geológicas que o constituem. Este Sistema aquífero tem valores de transmissividade entre 50 e 400 m²/d (Condeso de Melo, 2002) e, segundo Peixinho de Cristo (1985), aqueles valores ocorrem mais frequentemente entre 400 e 500 m²/d. Almeida *et al.* (2000d) indicam um coeficiente de armazenamento entre 10⁻⁶ e 10⁻².

Na Tabela 4.8 apresenta-se a síntese dos parâmetros hidráulicos estimados para as formações hidrogeológicas deste Sistema aquífero.

Tabela 4.8 - Parâmetros hidráulicos das formações do Sistema aquífero Cretácico de Aveiro (dados disponíveis em Almeida *et al.*, 2000d; Condeso de Melo, 2002).

Sistema aquífero Cretácico de Aveiro (O2)		Unidade hidrogeológica	Transmissividade (m ² /d)	Coefficiente de armazenamento
Grés Grosseiro Superior	C ⁴ - Grés de Verba	Aquitardo	50	--
	C ³⁻⁴ - Grés de Oiã	Aquífero	200	10^{-4} (10 ⁻⁶ a 10 ⁻²)
Grés Micáceo	200 - 400			
Formação Carbonatada	C ² - Calcários de Mamarrosa		100	
Grés Grosseiro Inferior	C ¹⁻² - Grés de Palhaça		300	

Em relação ao Sistema aquífero Tentúgal, Almeida *et al.* (2000f) indicam grande variabilidade dos valores de transmissividade, no entanto, apontam para o aquífero 1.4 a 21.9 m²/d como intervalo de referência (Tabela 4.9). A informação hidrogeológica disponível sobre o Sistema aquífero Viso - Queridas é escassa, como tal Almeida *et al.* (2000g) apresentam uma estimativa de transmissividade na ordem de 86 m²/d (Tabela 4.10).

O Sistema aquífero Cársico da Bairrada revela heterogeneidade e dispersão significativa nos parâmetros hidráulicos (Tabela 4.11), como se deduz do valor de transmissividade de 22400 m²/d obtido por Peixinho de Cristo (1985) face aos 15 a 600 m²/d de Almeida *et al.* (2000c).

Tabela 4.9 - Parâmetros hidráulicos das formações do Sistema aquífero Tentúgal (dados disponíveis em Almeida *et al.*, 2000f).

Sistema aquífero Tentúgal (O5)		Unidade hidrogeológica	Transmissividade (m ² /d)
Topo	C ³ - Grés de Furadouro	Aquífero livre a confinado	1.4 - 21.9
Intermédio	C ²⁻³ - Calcários de Tentúgal		--
		Aquitardo	--
Base	C ¹⁻² - Arenitos de Carrascal	Aquífero livre a confinado	1.4 - 21.9

Tabela 4.10 - Parâmetros hidráulicos das formações do Sistema aquífero Viso - Queridas (dados disponíveis em Almeida *et al.*, 2000g).

Sistema aquífero Viso - Queridas (O30)		Unidade hidrogeológica	Transmissividade (m ² /d)
Topo	C ⁵ - Arenitos e argilas de Viso	Improdutiva	
Intermédio	C ³ - Grés de Oiã	Aquífero livre a confinado	86
	C ³ - Grés de Furadouro		
	C ²⁻³ - Calcários de Tentúgal	Aquitardo	
Base	C ¹⁻² - Arenitos de Carrascal	Aquífero livre a confinado	86

Tabela 4.11 - Parâmetros hidráulicos das formações do Sistema aquífero Cársico da Bairrada (dados disponíveis em Almeida *et al.*, 2000c).

Sistema aquífero Cársico da Bairrada (O3)		Unidade hidrogeológica	Transmissividade (m ² /d)
Topo	J ^{1f} - Calcários margosos de Lemedede	Aquífero cársico	15 - 600
Intermédio	J ^{1ef} - Margas e calcários margosos de Vale das Fontes	Aquitardo	--
Base	J ^{1cd} - Camadas de Coimbra	Aquífero cársico	15 - 600

4.2 - Inventário dos pontos de água

A caracterização da hidrogeologia local implicou necessariamente o reconhecimento e estudo de pontos de água presentes nos dois domínios estudados. Nas duas bacias hidrográficas existe um grande conjunto de pontos de água, fundamentalmente poços. Estão distribuídos, essencialmente, por campos agrícolas ou de apoio à atividade pecuária. Efetuou-se o levantamento desses pontos de água, a respetiva identificação, caracterização (diâmetro, profundidade, altura do muro de proteção) e localização em termos de coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude elipsoidal) referenciadas segundo WGS 84.

A zona enquadrante da nascente de Montouro está envolvida por uma mancha florestal, e a microbacia hidrográfica caracteriza-se por expressar uma distribuição não uniforme de pontos

de água, com locais de elevada densidade e grandes zonas sem qualquer ponto. Em fevereiro de 2007, foi feito o levantamento dos poços de utilização agrícola existentes nas proximidades da nascente, nomeadamente a N e NE. A Figura 4.5 documenta este inventário inicial, com um total de 34 poços (P01 a P34) reconhecidos, para além do poço da nascente de Montouro (M00). Em julho de 2010, após a delimitação da MhM, realizou-se novo inventário de pontos de água, alargado a toda a área (Figura 4.6), com a identificação e seleção de um total de 19 poços (M01 a M19), para além de M00. Alguns dos poços são os mesmos da campanha inicial mas sofreram alteração da designação, nomeadamente P06, P22, P27, P32 e P33 que passaram a M12, M13, M14, M15 e M16, respetivamente.



Figura 4.5 - Localização dos pontos de água na envolvente da nascente de Montouro (sobre imagem de Google Earth, 2012).

Por toda a bacia hidrográfica de Ferveça existem muitos pontos de água, na sua maioria poços, que são utilizados para as práticas agrícola e pecuária. Em março de 2011, procedeu-se ao levantamento, identificação e seleção de 20 poços (F01 a F20), para além da exsurgência de Olhos da Ferveça (F00), cujas localizações podem ser visualizadas na Figura 4.7.

A Tabela 4.12 apresenta os dados estatísticos das profundidades dos pontos de água inventariados em ambas as bacias hidrográficas, excetuando os poços das exsurgências. As profundidades médias dos poços variam entre, aproximadamente, 4.1 e 4.6 m e a profundidade máxima é de cerca de 7.6 m.

O poço da nascente de Montouro tem uma profundidade de 2.1 m e o poço da exsurgência de Olhos da Ferveça inventariado tem cerca de 5.0 m de profundidade.

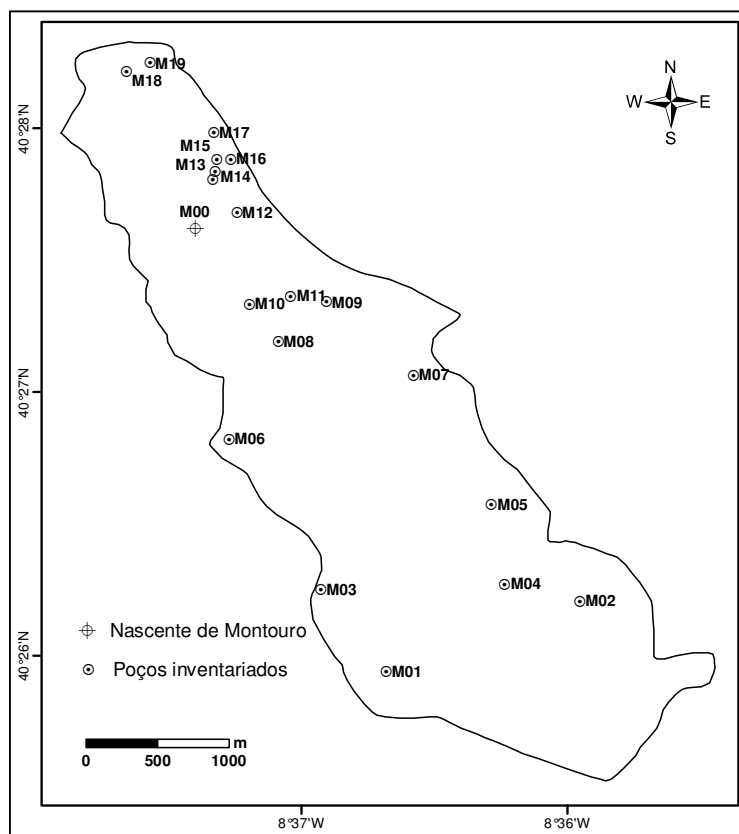


Figura 4.6 - Localização dos pontos de água inventariados na microbacia hidrográfica de Montouro.

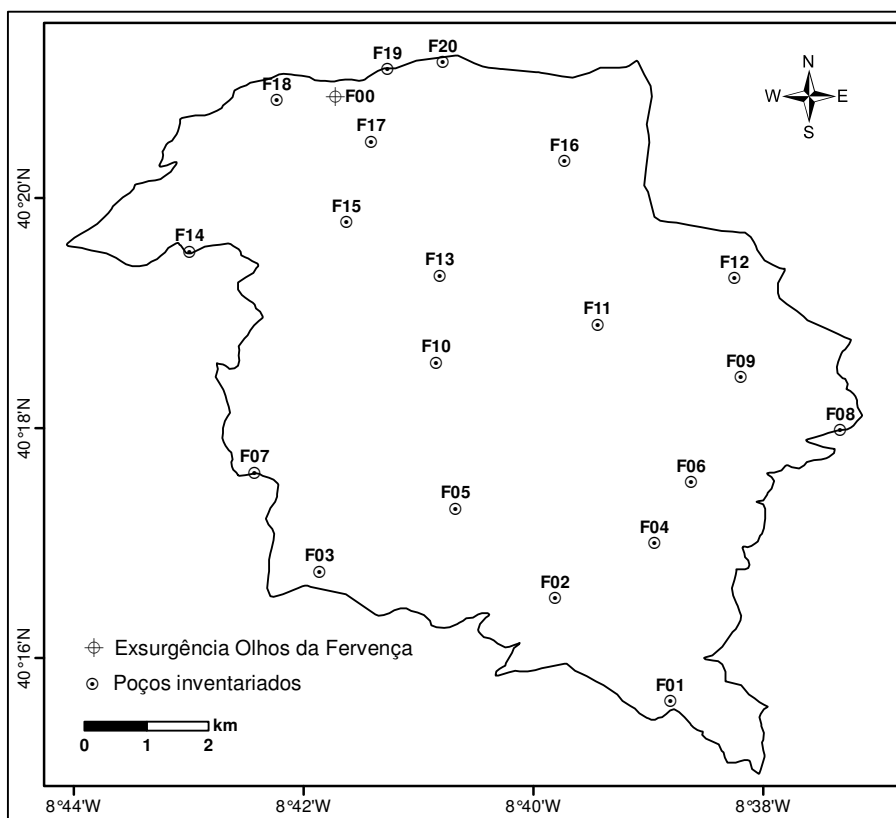


Figura 4.7 - Localização dos pontos de água inventariados na bacia hidrográfica de Ferverça.

Tabela 4.12 - Dados estatísticos da profundidade (m) dos pontos de água (poços) inventariados.

Parâmetro estatístico	Proximidades nascente Montouro	MhM	BhF
Média (μ)	4.11	4.42	4.62
Valor Máximo (MAX)	6.80	6.92	7.57
Valor Mínimo (MIN)	2.35	1.77	1.75
Nº de medidas	34	19	20

No sentido de ter uma maior precisão na localização dos pontos de água, especialmente no que diz respeito à quantificação da altimetria e, conseqüentemente, na avaliação da posição da superfície piezométrica, recorreu-se à utilização de um GPS diferencial (DGPS - Differential Global Positioning System - Sistema de posicionamento global diferencial). O equipamento utilizado foi o ProMark2 da Ashtech (Ashtech, 2002), que tem no modo estático uma precisão horizontal de, cerca de, 5 cm e uma precisão vertical aproximada de 10 cm.

Os procedimentos adotados para utilização deste GPS diferencial são os mesmos aplicados no trabalho desenvolvido por Machadinho (2014), e consistem em colocar o equipamento na vertical, nivelado, à altura de 2.10 m e fazer a aquisição de dados segundo o método estático-rápido, com tempo de observação inferior a 20 minutos (Figura 4.8).



(a)



(b)

Figura 4.8 - Aquisição de dados com gps diferencial (a) e pormenor da aquisição de dados (b).

A precisão dos dados recolhidos depende de vários fatores, nomeadamente, do número de satélites captado (no mínimo quatro), da configuração geométrica formada pelos satélites usados na medição, da existência de obstáculos próximos do recetor (edifícios, árvores, etc.), da influência da atmosfera, entre outros (Gonçalves *et al.*, 2008).

O grau de incerteza associado à configuração geométrica é traduzido através de um parâmetro designado DOP (Diluição de precisão - Dilution of Precision) e, especificamente, em relação à posição 3D o parâmetro é o PDOP (Diluição de precisão posicional - Positional Dilution of Precision). O valor do PDOP estima o impacto da precisão das observações do GPS devido à geometria dos satélites, e quanto mais pequeno é esse valor melhor é a precisão dos dados obtidos (Ashtech, 2002).

O método estático-rápido implica um tempo de observação da ordem dos 10 a 20 minutos seguido de um pós-processamento dos dados recorrendo a estações de referência (bases), tendo-se que, quando a distância entre o ponto de medida e a base é inferior a 20 km a precisão alcançada pode chegar a 1 cm + 2 ppm (Gonçalves *et al.*, 2008).

Em Portugal, o Instituto Geográfico do Exército (IGeoE) gere a rede SERVIR (Sistema de Estações de Referência GNSS VIRtuais) constituída por um conjunto de estações de referência permanentes de observação GNSS (Global Navigation Satellite System), e o Instituto Geográfico Português (IGP) tem a rede geodésica ReNEP (Rede Nacional de Estações Permanentes), constituída por estações GPS/GNSS, de observação contínua. Ambas as entidades fornecem dados em ficheiros RINEX (Receiver Independent Exchange Format) para pós-processamento e correção diferencial, disponibilizando altitudes elipsoidais. Consequentemente, também as altitudes utilizadas neste trabalho foram as elipsoidais.

A altitude elipsoidal (h) tem como superfície de referência o elipsoide (Figura 4.9) e é obtida através da soma da ondulação do geóide (N) com a altitude ortométrica (H), como expresso na equação [4.4].

$$h = N + H \quad [4.4]$$

A ondulação do geóide corresponde à distância entre o elipsoide e o geóide, medida ao longo da normal ao elipsoide. A altitude ortométrica representa a distância entre o geóide e a superfície terrestre, medida ao longo da linha de prumo e a altitude elipsoidal será a distância entre o elipsoide e a superfície terrestre, medida ao longo da normal ao elipsoide (Figura 4.9). Para as áreas em estudo, MhM e BhF, a ondulação do geóide apresenta uma variação constante.

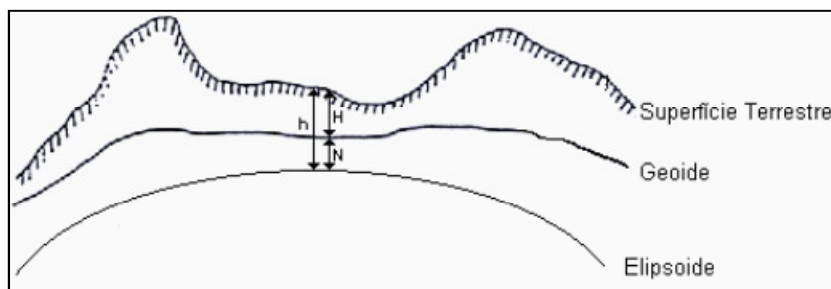


Figura 4.9 - Superfícies de referência altimétricas usadas em geodesia (IGP, 2012).

Os dados recolhidos com o GPS diferencial foram posteriormente processados com recurso ao *software* da Ashtech Solutions (Ashtech Solutions, 2002), e corrigidos através das estações de referência de Águeda do IGP (IGP, 2012, 2013) e de Coimbra do IGeoE (IGeoE, 2012). A base de Águeda serviu para corrigir os pontos de medida na microbacia hidrográfica de Montouro e Coimbra para as medições efetuadas na bacia hidrográfica de Ferveça.

Os erros da altitude elipsoidal, após o ajuste conseguido no pós-processamento para cada um dos pontos de água inventariado, estão representados na Figura 4.10, na Figura 4.11 e na Figura 4.12. Considerando todos os pontos de água, verifica-se que 99 % dos erros da altitude elipsoidal são inferiores a 10 cm e 12 % menores que 5 cm (Figura 4.13), tendo-se alcançado

um grau de precisão elevado e da ordem de grandeza dos especificados para a utilização de bases das redes ReNEP (menor que 10 cm) e SERVIR (inferior a 5 cm até uma distância de 20 km da linha de base). No caso dos pontos da MhM a distância média à base de Águeda é de, aproximadamente, 19.6 km, e em relação aos pontos da BhF a distância média à base de Coimbra é, cerca de, 24.7 km, superior aos 20 km referidos, mas como a zona é no geral plana, com captação de bom número de satélites e com boa receção do sinal de satélite, o grau de precisão não foi afetado, como comprovam os resultados.

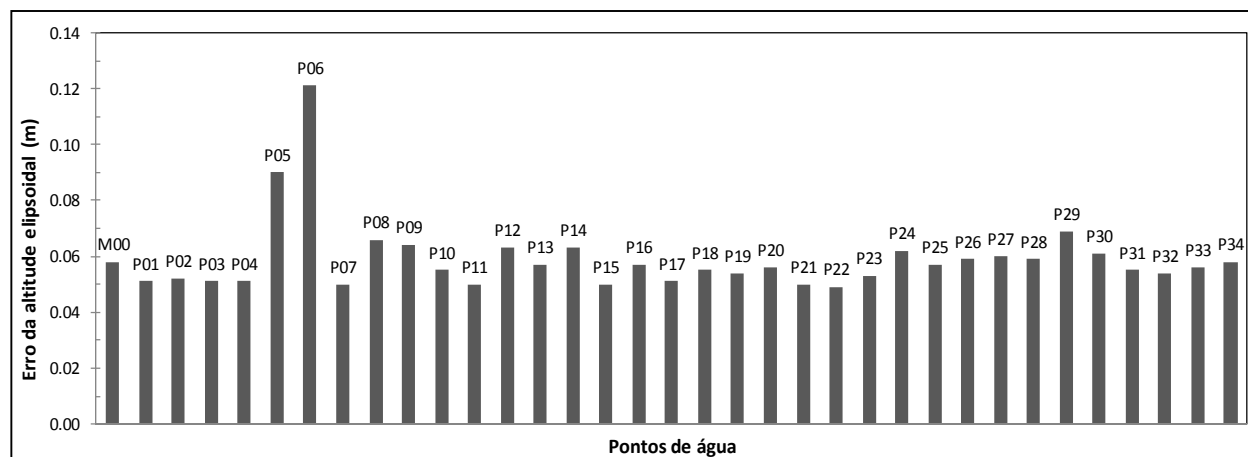


Figura 4.10 - Erros da altitude elipsoidal nos poços da envoltura da nascente de Montouro.

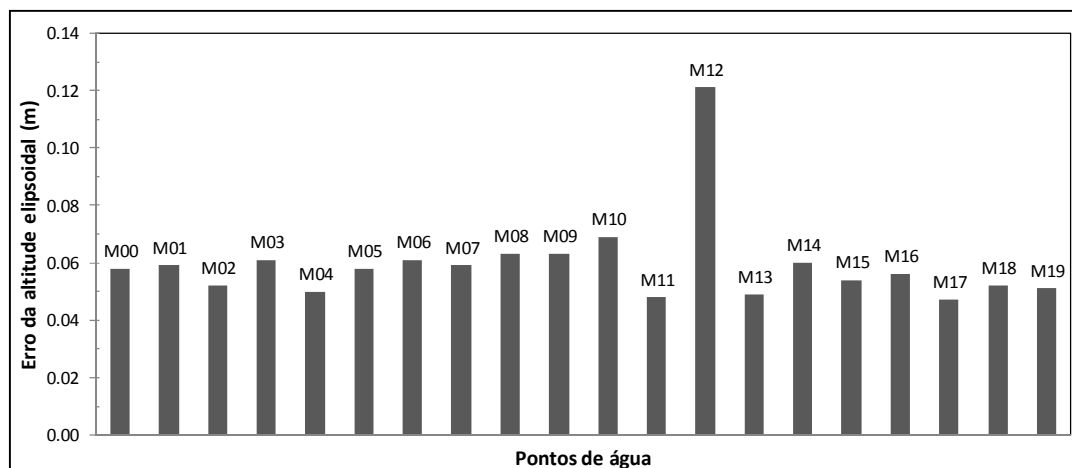


Figura 4.11 - Erros da altitude elipsoidal nos poços da microbacia hidrográfica de Montouro.

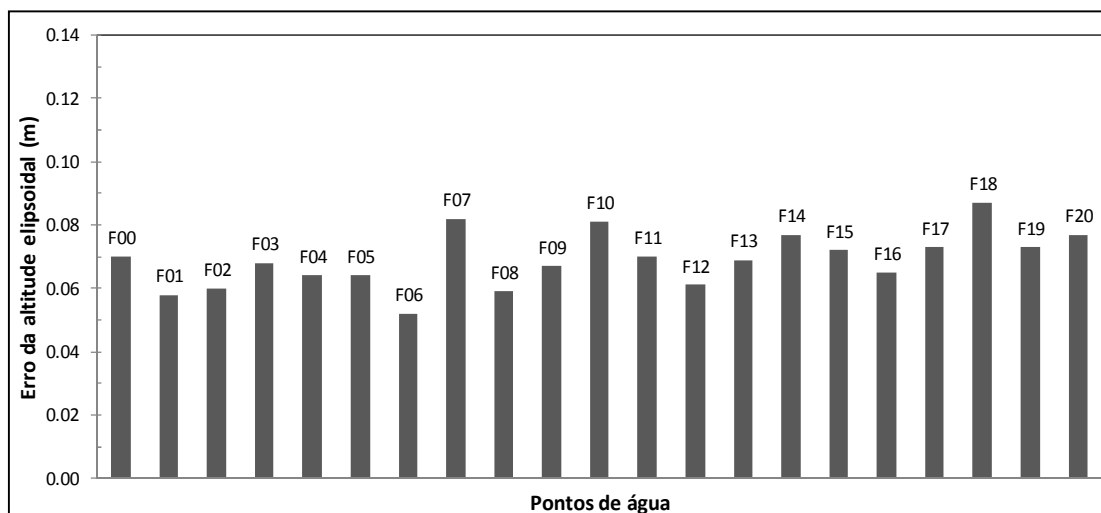


Figura 4.12 - Erros da altitude elipsoidal nos poços da bacia hidrográfica de Ferveça.

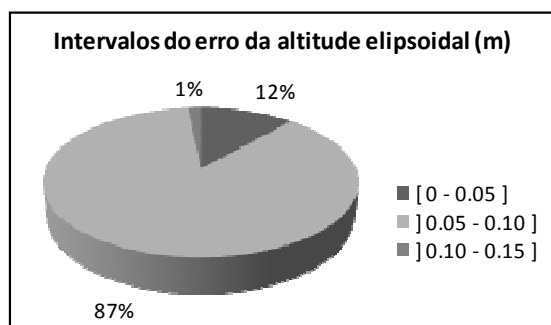


Figura 4.13 - Erros da altitude elipsoidal para todos os poços medidos.

4.3 - Piezometria

As medições dos níveis piezométricos foram efetuadas com uma sonda de nível Geotechnical Instruments DM2.1-30 (Geotechnical Instruments, 2005), quando os pontos de água (poços) se encontravam em fase de não-exploração. Foi também determinada a altura do muro do poço, no local de medição da profundidade da água, de modo a possibilitar a determinação do nível hidrostático (NHE), com referência ao elipsoide (altitude elipsoidal da superfície). Na Figura 4.14 pode-se visualizar os equipamentos utilizados.

Os valores dos níveis piezométricos foram usados para construir mapas de superfície potenciométrica e de fluxo hídrico subterrâneo, recorrendo ao *software* Surfer (Golden Software Inc., 2009), através do método de krigagem.

Como foram realizadas duas campanhas por ano, uma na época de inverno e outra na de verão, os elementos piezométricos permitiram ainda analisar a variação da superfície piezométrica e, conseqüentemente estimar a variação nos volumes armazenados entre os períodos húmido e seco consecutivos e após o ano hidrológico.



Figura 4.14 - Sonda de nível e fita métrica utilizados nas campanhas piezométricas.

4.3.1 - Piezometria na microbacia hidrográfica de Montouro

De fevereiro de 2007 a maio de 2010, realizaram-se duas campanhas anuais de medições do nível da água nos pontos de água situados nas imediações da nascente de Montouro (Figura 4.5), nomeadamente nas épocas de inverno e verão. Estes poços situam-se no topo aplanado do Quaternário e denotam uma tendência semelhante de comportamento dos níveis entre campanhas da mesma época, evidenciando a estabilidade da unidade aquífera (Figura 4.15).

A partir de julho de 2010, as medições sazonais *in situ* dos níveis piezométricos passaram a ser efetuadas na área da microbacia hidrográfica, possibilitando a avaliação da hidrodinâmica das unidades aquíferas freáticas.

As cartas piezométricas de inverno foram elaboradas incluindo o nível da água do poço da nascente (M00), pois foi considerado representativo do nível freático nesse local, uma vez que ocorria ligação hidráulica entre o poço e a linha de água próxima. As cartas piezométricas do período de verão não consideram o poço M00, pois o nível freático local situa-se abaixo do fundo do poço e devido à falta de outros pontos de água nas imediações.

Na Figura 4.16, na Figura 4.17 e na Figura 4.18 apresentam-se as cartas piezométricas relativas às campanhas de inverno e de verão de 2011 e de inverno de 2012, respetivamente.

Como referido em 4.2 a distribuição de pontos de água na MhM não é uniforme, fazendo com que o fluxo expresso em domínios específicos possa afastar-se ligeiramente do esperado por comparação com outros casos equivalentes. No entanto, apesar desta limitação identifica-se em todas as cartas (Figura 4.16 a Figura 4.18) uma direção preferencial para o escoamento subterrâneo, que é ESE para WNW. Esta direção denota a influência da topografia e a interferência de elementos estruturais, nomeadamente a atitude regional da estratificação (NS, mergulhante para W) e a presença de fraturas NW-SE de natureza regional e local (Correia *et al.*, 2014a; Correia *et al.*, 2014b).

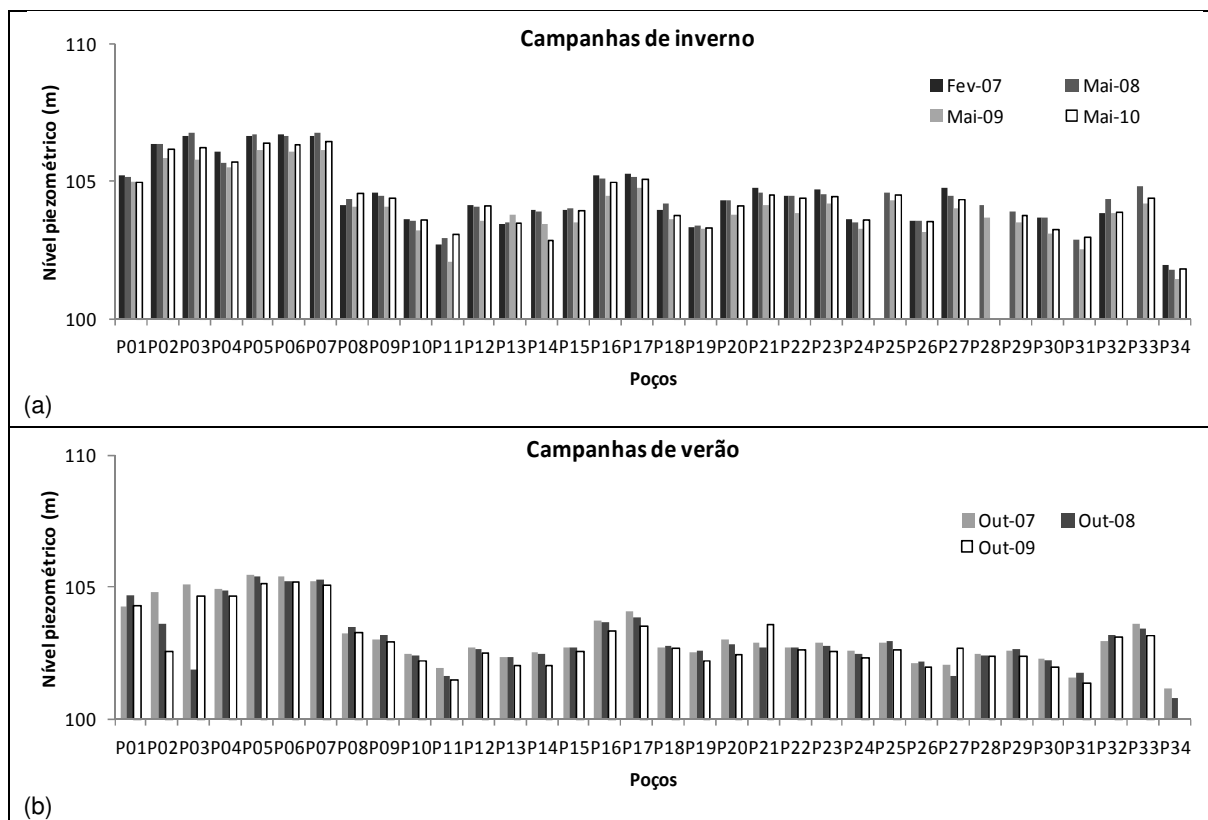


Figura 4.15 - Evolução dos níveis piezométricos nas campanhas de inverno (a) e verão (b) entre fevereiro de 2007 e maio de 2010.

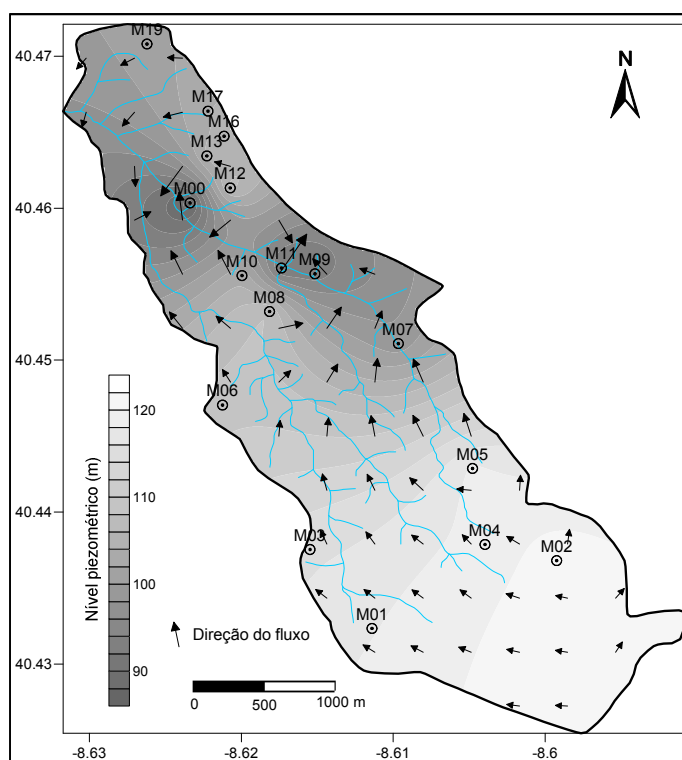


Figura 4.16 - Carta piezométrica da campanha de inverno de 2011 na MhM.

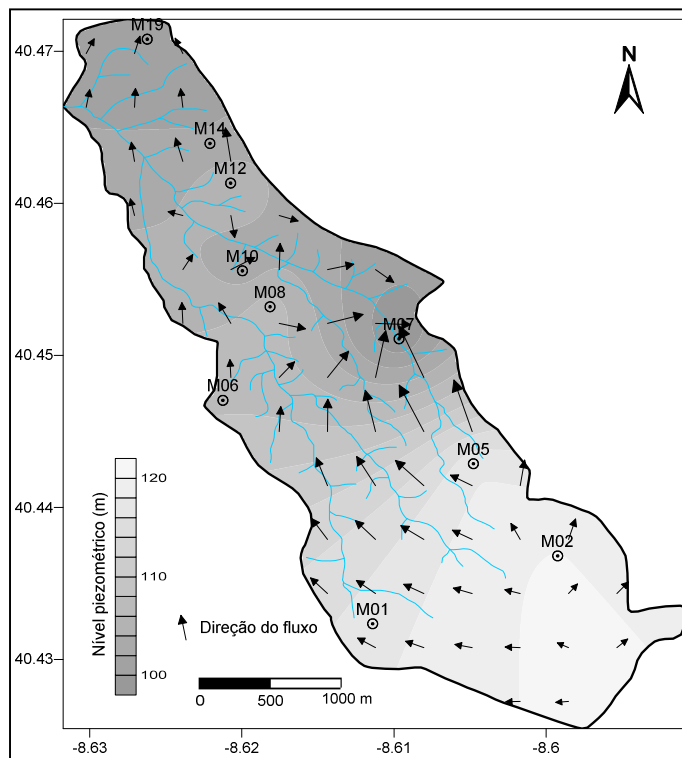


Figura 4.17 - Carta piezométrica da campanha de verão de 2011 na MhM.

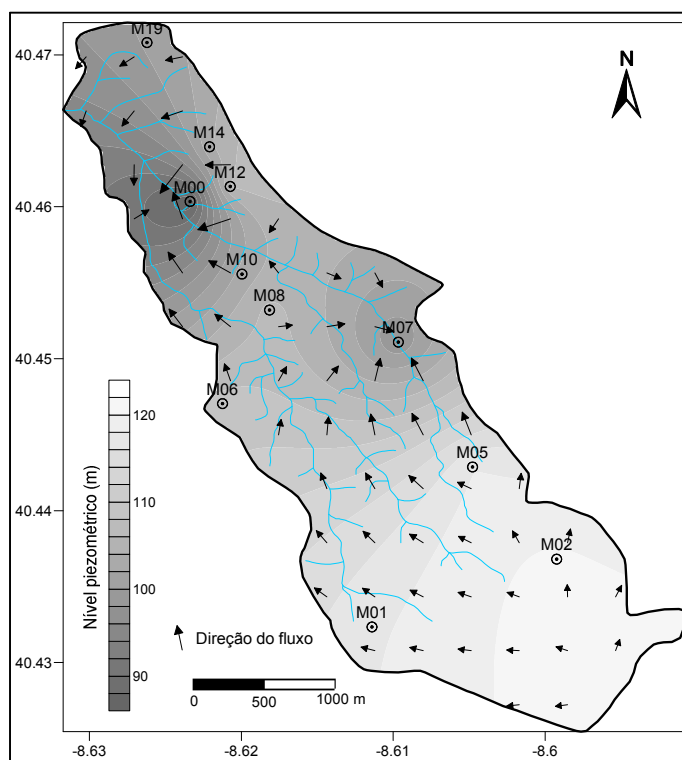


Figura 4.18 - Carta piezométrica da campanha de inverno de 2012 na MhM.

A Tabela 4.13 resume os dados estatísticos relativos aos níveis piezométricos para as mesmas campanhas (inverno 2011 – NPIInv11; verão 2011 – NPVer11 e inverno de 2012 – NPIInv12), sem considerar as medições de M00.

O número de medidas na campanha de inverno de 2011 é de 16 face às 10 medidas em cada uma das campanhas seguintes. As medições no verão de 2011 e no inverno de 2012 são relativas aos mesmos pontos de água.

Tabela 4.13 - Dados estatísticos dos níveis piezométricos (m) na MhM.

Parâmetro estatístico	NPIInv11	NPVer11	NPIInv12
Média (μ)	107.20	107.80	108.19
Valor Máximo (MAX)	121.04	120.09	120.24
Valor Mínimo (MIN)	91.84	98.04	98.38
Moda (M_o)	#N/D	#N/D	#N/D
Mediana (P_{50})	105.44	106.32	106.26
Desvio padrão (σ)	9.02	7.77	7.77
Percentil P_{10}	95.83	99.88	100.13
Percentil P_{90}	118.42	117.76	118.10
Nº de medidas	16	10	10

#N/D - não determinável

Os valores do nível freático apresentam-se relativamente semelhantes, com valores médios da ordem dos 107 a 108 m, máximos de 120 a 121 m e mínimos de, aproximadamente, 98 a 92 m. Este último valor (92 m) foi registado no inverno de 2011, que é atípico quando comparado com os das restantes campanhas, mas que advém do diferente número de poços amostrado. A análise das duas campanhas NPVer11 e NPIInv12 (com amostragem dos mesmos poços) permite constatar a influência do inverno menos chuvoso em 2012, com o nível mínimo apenas ligeiramente superior ao do verão de 2011.

4.3.2 - Piezometria na bacia hidrográfica de Ferveça

As campanhas de monitorização dos níveis da água na bacia hidrográfica de Ferveça foram realizadas em três períodos distintos: inverno de 2011 (NPIInv11), verão de 2011 (NPVer11) e inverno de 2012 (NPIInv12).

As cartas piezométricas (Figura 4.19, Figura 4.20 e Figura 4.21) foram elaboradas considerando separadamente o Sistema aquífero mais profundo (cársico) e o Sistema aquífero superior (Quaternário/Cretácico), identificados em 4.4.2.

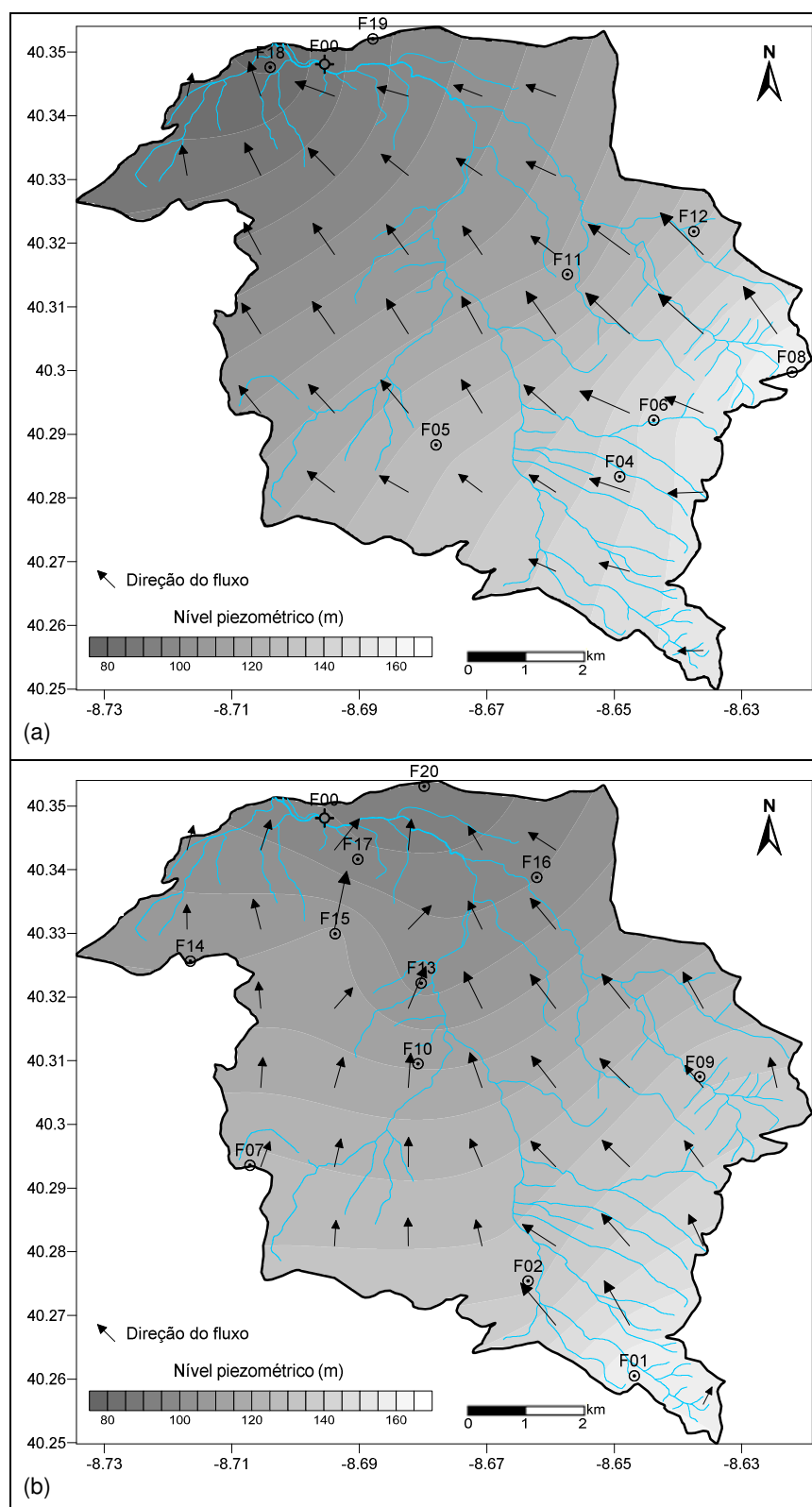


Figura 4.19 - Carta piezométrica da bacia hidrográfica de Ferveça no inverno de 2011 para os Sistemas aquíferos cársico (a) e Quaternário/Cretácico (b).

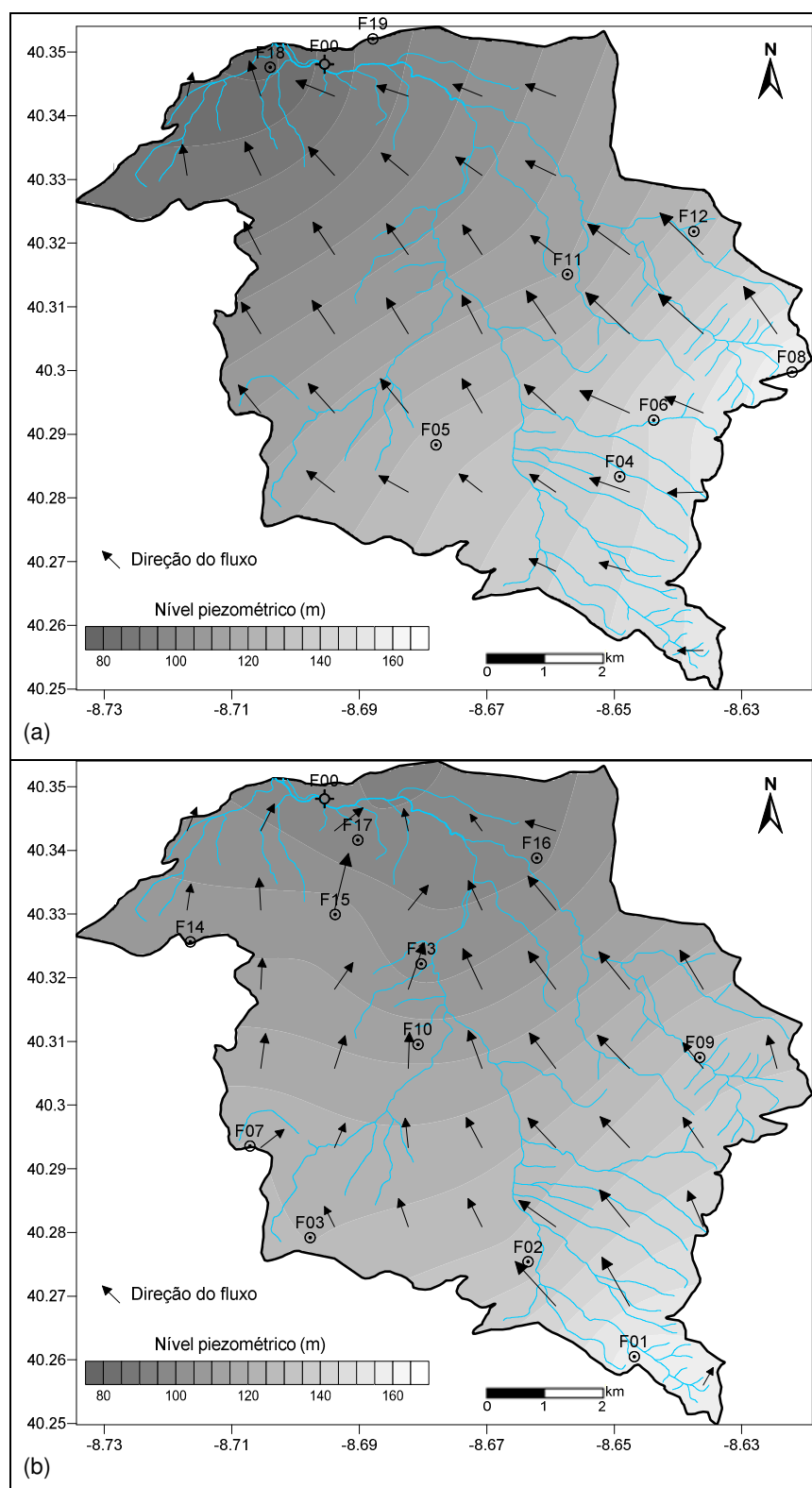


Figura 4.20 - Carta piezométrica da bacia hidrográfica de Ferveça no verão de 2011 para os Sistemas aquíferos cárstico (a) e Quaternário/Cretácico (b).

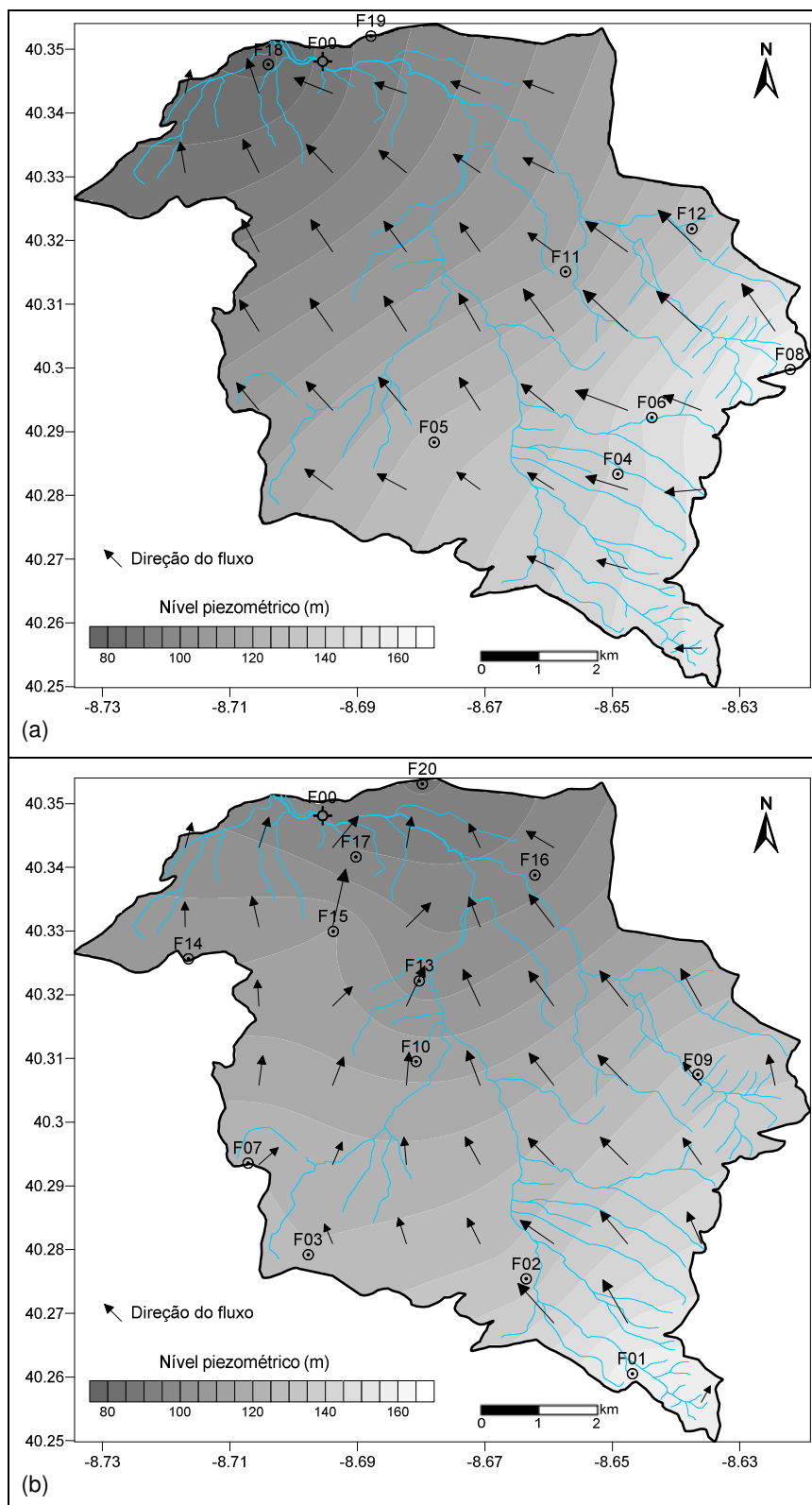


Figura 4.21 - Carta piezométrica da bacia hidrográfica de Ferveça no inverno de 2012 para os Sistemas aquíferos cársico (a) e Quaternário/Cretácico (b).

A análise das várias cartas evidencia uma semelhança de comportamento do fluxo em todas as campanhas refletindo a estabilidade dos sistemas aquíferos. As linhas de fluxo subterrâneo revelam um considerável paralelismo com as linhas de água superficiais e existe uma

convergência do fluxo subterrâneo na zona da exurgência Olhos da Ferverça (F00), como também salientado por Marques da Silva (2009). O escoamento subterrâneo no Sistema aquífero Quaternário/Cretácico ocorre com uma direção, sensivelmente, de S para N no lado oeste da bacia hidrográfica e de ESE para WNW no lado E. O Sistema aquífero cársico tem um escoamento subterrâneo preferencial de ESE para WNW, denotando a influência do anticlinal de Cantanhede. De salientar a distribuição irregular de pontos de água que captam este sistema, como tal, na parte E da área da bacia hidrográfica as superfícies piezométricas apresentadas resultam fundamentalmente da interpolação do programa informático.

Os parâmetros estatísticos referentes aos níveis piezométricos estão sintetizados na Tabela 4.14, distinguindo entre o Sistema aquífero cársico e o Sistema aquífero Quaternário/Cretácico.

Os valores dos níveis piezométricos no sistema cársico variam entre cerca de 79 a 160-163 m, com médias de 124-125 m. No sistema superior, as médias são de 116 a 118 m, com máximos de 158 a 160 m e mínimos de 89 a 96 m. Na campanha de verão de 2011, o ponto de água que, nas outras campanhas, regista o valor mínimo não foi medido, fazendo com que o valor para este parâmetro esteja ligeiramente acima do que seria expectável.

Tabela 4.14 - Dados estatísticos dos níveis piezométricos (m) na BhF, para os Sistemas aquíferos cársico (Cars) e Quaternário/Cretácico (Q/C).

Parâmetro estatístico	NPIInv11		NPVer11		NPIInv12	
	Cars	Q/C	Cars	Q/C	Cars	Q/C
Média (μ)	124.89	116.11	123.57	118.00	123.88	115.87
Valor Máximo (MAX)	162.61	159.68	160.38	157.67	161.28	158.09
Valor Mínimo (MIN)	79.49	90.22	78.91	95.73	78.94	89.36
Moda (M_o)	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Mediana (P_{50})	128.51	111.11	127.52	113.15	127.73	111.63
Desvio padrão (σ)	27.71	20.48	27.30	18.42	27.54	19.61
Percentil P_{10}	89.36	96.30	88.25	98.84	88.21	95.88
Percentil P_{90}	151.95	134.01	150.09	132.18	150.99	132.55
Nº de medidas	8	11	8	11	8	12

#N/D - não determinável

4.4 - Modelo hidrogeológico conceptual

Qualquer modelo é uma simplificação de um sistema real que se conhece apenas pontualmente através de um número limitado de dados (Custodio & Llamas, 1976). A conceção de um modelo que enquadre o funcionamento global de um qualquer sistema aquífero, só é viável e aceitável, se integrar todos os dados relativos à geologia, à hidrodinâmica, e também, à hidrogeoquímica (Marques da Silva, 2000; 2009).

As propostas de modelos hidrogeológicos conceptuais para os dois domínios em estudo baseiam-se, necessariamente, nas diversas informações apresentadas ao longo deste trabalho e que englobam fundamentalmente: a topografia, a geomorfologia, a geologia, a interpretação estrutural, os dados das sondagens mecânicas, os alinhamentos condutivos interpretados através da geofísica, a hidrodinâmica, a hidrogeoquímica e os elementos hidroclimáticos.

Azevedo (1998) salienta que, apesar do enquadramento geográfico e climático determinar diretamente o regime e a intensidade da recarga hídrica, a progressão subterrânea da água depende fundamentalmente das características intrínsecas do próprio meio.

4.4.1 - Modelo hidrogeológico conceptual para Montouro

Na MhM a construção deste modelo tem que considerar a ocorrência de duas unidades aquíferas principais: o aquífero superior freático, explorado nas captações (poços) da zona, e o aquífero mais profundo responsável pela água emergente na nascente de Montouro.

O aquífero freático evidencia escoamento subterrâneo com direção predominante ESE para WNW. A recarga das unidades aquíferas freáticas ocorrerá maioritariamente nos sectores sul e central da microbacia hidrográfica, situados a E e SE da nascente de Montouro, nomeadamente nas faixas topograficamente aplanadas e ocupadas com as formações detríticas permeáveis (Correia *et al.*, 2014a).

A unidade aquífera associada à nascente de Montouro pertencerá ao Sistema aquífero Cretácico de Aveiro (O2). O armazenamento e a circulação nesta unidade evoluirão na base das formações Grés de Furadouro e Grés de Oiã. A formação carbonatada Calcários da Mamarrosa, subjacente funcionará como muro da unidade aquífera.

A circulação subterrânea decorrerá de SE para NW, condicionada pela estratificação do Cretácico e do Jurássico que mergulha para NW. A zona principal de recarga do aquífero estará situada a E e SE da nascente, em domínios localizados no interior da microbacia hidrográfica e/ou para além desta. A recarga ocorre de forma direta, quando formações da unidade aquífera afloram, ou de forma indireta, por drenância a partir das unidades aquíferas superiores.

A exurgência de Montouro é um ponto de descarga natural e a sua localização estará determinada pela passagem de uma falha regional profunda com orientação NE-SW que, intersetada por fraturação local NW-SE, promove a emergência artesianas da água. A elevada mineralização da água de Montouro (capítulo 5) confirma os circuitos de circulação profundos e uma expressiva interação água-rocha, nomeadamente com possíveis formações evaporíticas existentes na base das formações sedimentares (capítulo 2).

Campos (1944) também sustenta que a água de Montouro tem um percurso mais profundo e longo no qual se mineraliza e que sobe através de uma falha até encontrar camadas de areia por onde circula no sentido da inclinação, motivo pelo qual os poços existentes a NE e E não encontram a mesma água da nascente pois não atingem a camada de areia que conduz a água mineral e também devido à existência de níveis de argilas impermeáveis. Este autor apresenta um corte executado na nascente de Montouro interpretativo da “toalha aquífera”, onde são visíveis estratos cretácicos de areias quartzo-feldspáticas que intercalam com argilas vermelhas ou cinzentas, com inclinação de 10° para NW (Figura 4.22).

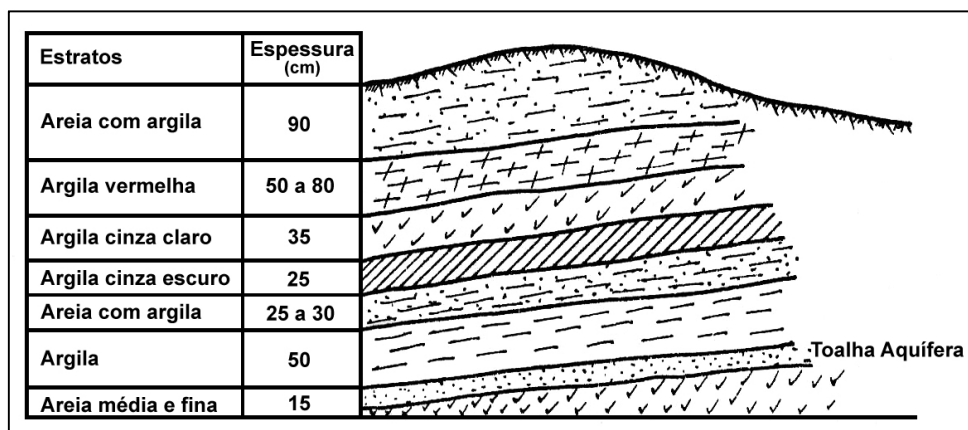


Figura 4.22 - Corte estratigráfico na nascente de Montouro (adaptado de Campos, 1944; Acciaiuoli, 1953).

A Figura 4.23 esquematiza a proposta de modelo hidrogeológico conceptual para o aquífero associado à nascente de Montouro. O perfil SE-NW tem uma escala vertical exagerada duas vezes de forma a possibilitar uma melhor visualização. As falhas prováveis apresentadas resultaram da análise conjunta do enquadramento estrutural, da interpretação dos alinhamentos condutivos e da presença de degraus tectónicos detetada com a prospeção geofísica e da interpretação do modelo digital do terreno. Representam-se falhas verticais seguindo a tendência regional, também, evidenciada em trabalhos de outros autores (Barbosa, 1981b; Rocha, 1993).

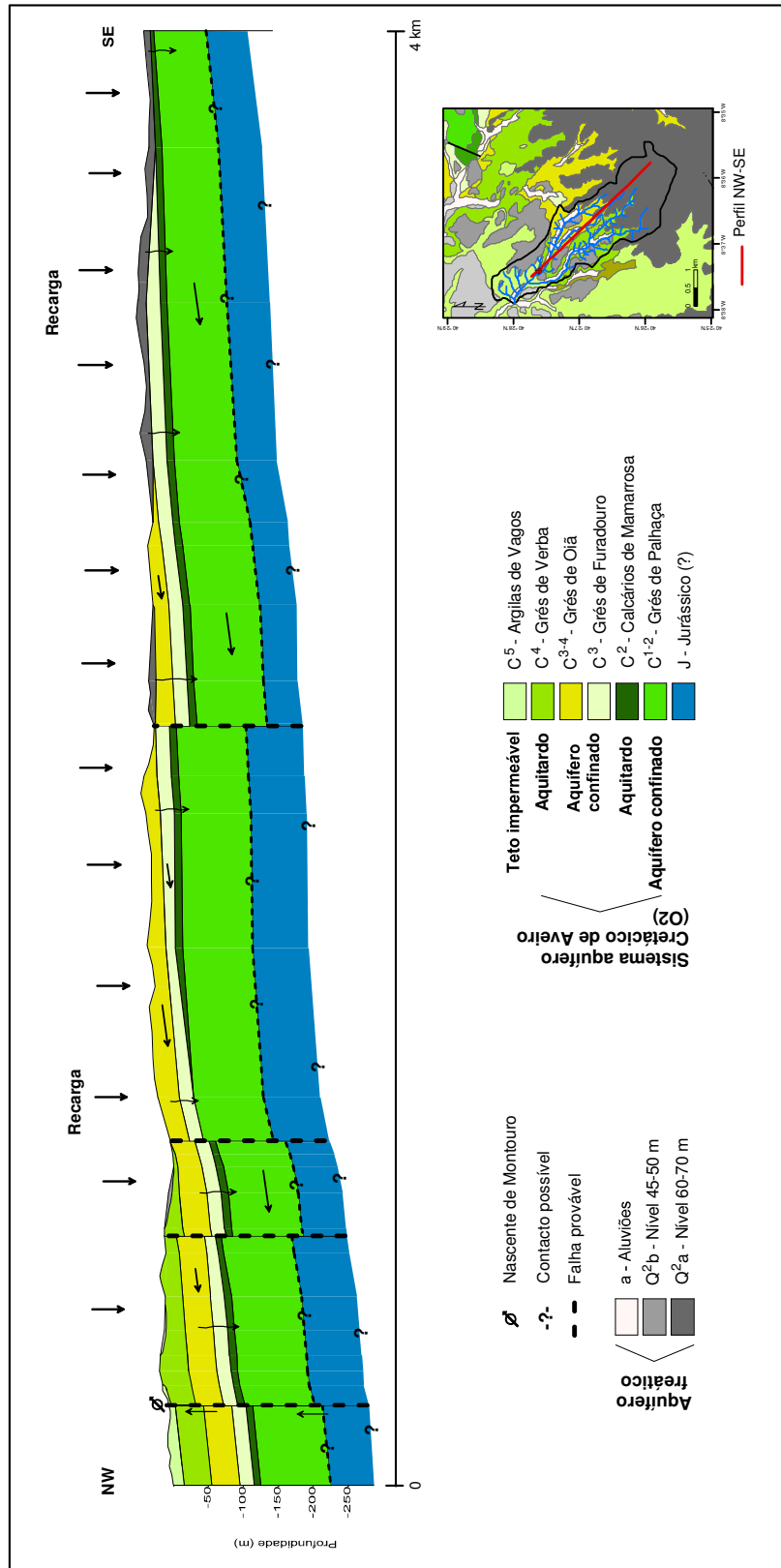


Figura 4.23 - Modelo conceptual para a hidrogeologia das envolventes da nascente de Montouro.

4.4.2 - Modelo hidrogeológico conceptual para Fervença

Hidrogeologicamente, é possível distinguir para a bacia hidrográfica de Fervença a existência de:

- um sistema mais próximo da superfície, que engloba várias unidades aquíferas sobrepostas, com pontual ligação hidráulica entre si e pertencentes aos Sistemas aquíferos Quaternário de Aveiro (O1), Tentúgal (O5) e Viso - Queridas (O30);
- um sistema mais profundo (exceto nos locais de afloramento) constituído por formações carbonatadas do Sistema aquífero Cársico da Bairrada (O3).

O sistema superior caracteriza-se por apresentar uma grande extensão na área em estudo, com a zona de recarga a distribuir-se pelos locais de afloramento, nomeadamente no lado W e SE da BhF, onde o relevo é aplanado e propício à infiltração.

O sistema mais profundo caracteriza-se pela ocorrência localizada de afloramentos na zona E da BhF, bem como a N, próximo das exurgências de Olhos da Fervença. A recarga ocorre nas zonas onde afloram as formações carbonatadas e poderá, igualmente, verificar-se através de processos de drenância que se desenvolvam entre as unidades superiores e as mais profundas. As exurgências constituem um ponto de descarga natural do Sistema aquífero Cársico da Bairrada.

Na Figura 4.24 apresenta-se um esquema ilustrativo da circulação da água subterrânea na BhF, mais concretamente da água que alimenta as exurgências de Olhos da Fervença. O perfil hidrogeológico interpretativo resultou fundamentalmente da integração dos elementos geológico-estruturais (fracturação real e inferida e atitude geral dos estratos sedimentares) com os hidrogeológicos locais e regionais. O perfil NW-SE foi elaborado com um exagero vertical de duas vezes, de modo a facilitar a sua visualização.

Os extensos depósitos de cobertura inviabilizam a visualização das unidades inferiores, no entanto, é de salientar a informação mencionada por Inova-EEM (2014a) e que refere que a zona das captações de Olhos da Fervença é caracterizada por uma formação de areias finas com siltes e argila, assentes numa banca calcária (calcários liásicos).

Os depósitos não permitem, igualmente, observar a atitude geral das unidades inferiores ou identificar possíveis movimentos provocados por fraturação local e, que se crê, ser fortemente condicionadora da circulação da água. A marcação da maioria das falhas prováveis tem sustentação nos resultados da geofísica realizada na zona (subcapítulo 3.3), no mapa estrutural e na carta de alinhamentos estruturais apresentados no subcapítulo 2.6, considerando a hipótese de, localmente, ocorrerem movimentos verticais responsáveis pelo afloramento ou presença a reduzida profundidade da unidade Camadas de Coimbra, na zona das exurgências de Olhos da Fervença. Como forma de simplificação, optou-se pela marcação de falhas verticais.

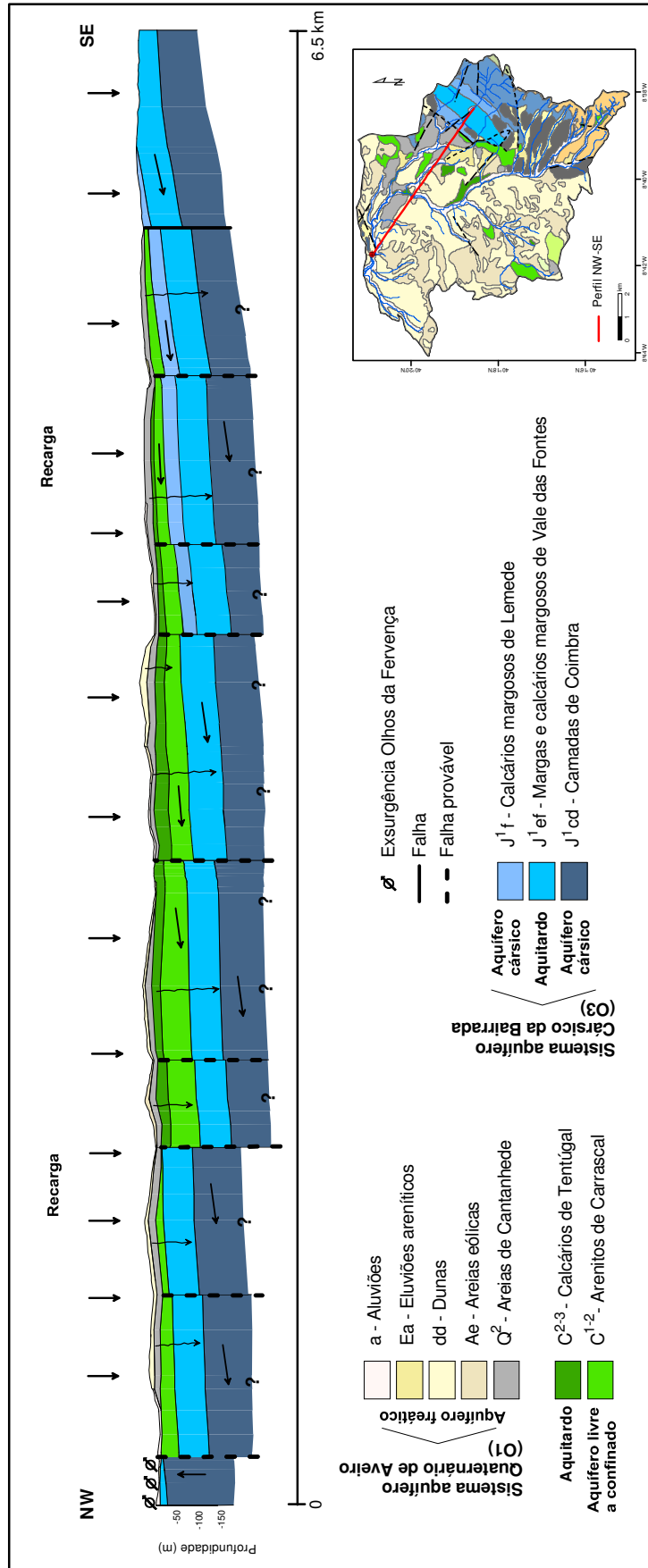


Figura 4.24 - Modelo conceptual interpretativo da hidrogeologia dos domínios envolventes das exsurgências de Olhos da Ferverça.

4.5 - Balanço hídrico e recarga aquífera

Ao ocorrer precipitação atmosférica numa determinada região, parte dessa água atinge a superfície do solo (precipitação eficaz), podendo ocorrer infiltração e/ou escoamento superficial. A água infiltrada pode ser vista como potencial de recarga aquífera, apesar de poder ser devolvida à atmosfera por evapotranspiração ou poder simplesmente permanecer na zona não saturada por algum tempo (Healy, 2010). No entanto, aquela que passa através da interface entre o substrato pedológico ou lito-pedológico e o sub-substrato rochoso (Azevedo, 1998) e que entra na zona saturada após ter atingido o nível freático (Freeze & Cherry, 1979), corresponde ao *input* hídrico numa unidade ou sistema aquífero ou infiltração profunda. Em muitas situações toda a recarga aquífera corresponde à infiltração profunda.

Dependendo do caminho seguido pela percolação de água até ao nível freático, a recarga pode ser classificada como recarga direta quando existe infiltração da água até à unidade aquífera, ou de recarga indireta quando ocorre transferência hídrica a partir de um rio ou de outras massas de água superficiais (Condesso de Melo, 2002).

A recarga aquífera é influenciada ou condicionada por vários parâmetros, nomeadamente espaciais, temporais, climáticos, geológicos, pedológicos, estruturais, topográficos, hidrológicos e de ocupação do solo.

Trabalhos anteriores desenvolvidos na região apresentam estimativas da recarga dos aquíferos, apresentando-se de seguida alguns desses valores.

Peixinho de Cristo (1985) indica para as três unidades aquíferas do Sistema aquífero Quaternário de Aveiro uma recarga anual média entre 200 e 250 mm/ano, equivalente a aproximadamente 215 a 269 mm/ano se considerarmos a área total do aquífero de 931 km² (Almeida *et al.*, 2000e).

Relativamente ao Sistema aquífero Cretácico de Aveiro, Marques da Silva (1990) estimou valores de recarga na ordem de 150 mm/ano. Lobo-Ferreira *et al.* (1995b) indicam 160 mm/ano e Condesso de Melo (2002) determinou a recarga aquífera por vários métodos e obteve um valor médio de, cerca de, 138 mm/ano.

Para o Sistema aquífero Cárstico da Bairrada a recarga referida por Peixinho de Cristo (1985) é da ordem de 300 a 450 mm/ano, Almeida *et al.* (1999) apresentam 350 mm/ano e Correia & Marques da Silva (1999) indicam estimativas entre 23 a 30 % da precipitação total.

A recarga do Sistema aquífero Tentúgal é de aproximadamente 150 mm/ano (Almeida *et al.*, 2000f), valor igualmente indicado para o Sistema aquífero Viso - Queridas (Almeida *et al.*, 2000g).

Lobo-Ferreira *et al.* (1995a) sintetizam valores de recarga da água subterrânea por concelho, sendo designado para o concelho de Cantanhede o valor de 378 mm/ano.

A estimativa da recarga aquífera pode ser feita através de diferentes métodos. Por exemplo, os métodos físicos baseiam-se em técnicas diretas, como a utilização de lisímetros ou da variação do nível piezométrico, ou técnicas indiretas que consideram a estimativa através dos parâmetros físicos do solo. Os métodos geoquímicos recorrem ao uso de técnicas químicas e isotópicas, enquanto os métodos inversos usam modelação numérica para resolver a equação de estimativa da recarga aquífera.

4.5.1 - Método de Penman-Grindley

O método de Penman-Grindley (Penman, 1950; 1951; Grindley, 1967), inicialmente desenvolvido para determinar o déficit de humidade no solo e a evapotranspiração real, viria a ser usado para estimar a recarga subterrânea. É um método empírico que se processa através de um balanço hídrico realizado ao nível do solo, considerando que a água é armazenada como humidade do solo, podendo ser aumentada por infiltração ou reduzida por ação da evapotranspiração. Após ser atingida a capacidade de campo, caso haja excesso de precipitação esta reparte-se pela escorrência superficial e pela recarga subterrânea (Figura 4.25).

A equação [4.5] traduz o balanço de água no solo, num determinado período de tempo e para uma zona uniforme, onde P (mm) é a precipitação, ETR (mm) é a evapotranspiração real, R é a escorrência superficial (mm) e ΔS (mm) é a variação da água armazenada no solo e no subsolo.

$$P = ETR + R + \Delta S \quad [4.5]$$

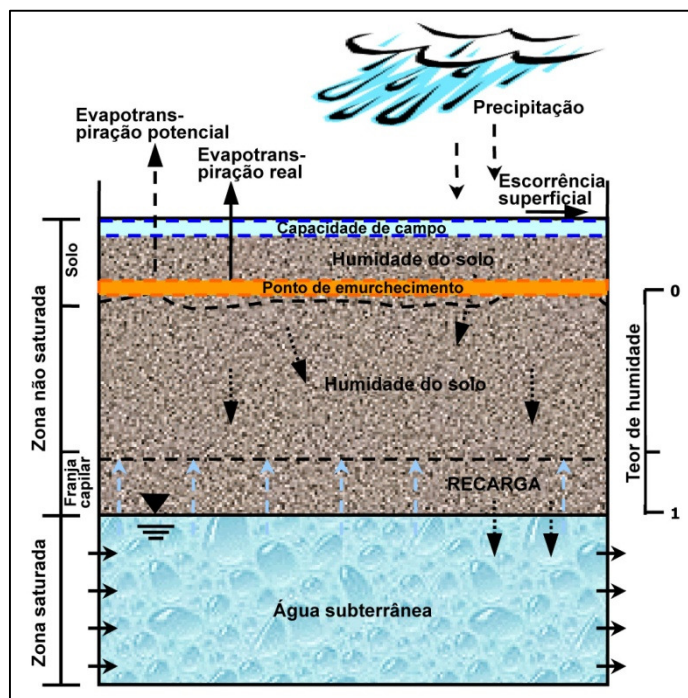


Figura 4.25 - Conceptualização do modelo de Penman-Grindley (adaptado de Condesso de Melo, 2002).

A quantificação da evapotranspiração real (ETR) pode ser feita através de diferentes métodos, sendo que alguns pressupõem um cálculo prévio da evapotranspiração potencial (ETP). Fez-se a determinação da ETP pelo método empírico proposto por Thornthwaite (1948), que é de relativa simplicidade, necessitando apenas dos dados de temperatura, mas que apresenta resultados positivos comparativamente a outros métodos mais complexos e/ou que usam maior número de dados (nem sempre disponíveis, como é o caso nas zonas de estudo onde não existem estações meteorológicas que reúnam a totalidade da informação que seria necessária).

Neste caso, irão usar-se os dados da temperatura da estação de Coimbra/Bencanta, que são caracterizadores da temperatura média do ar nas áreas de estudo, como referido em 2.3. Os cálculos foram realizados recorrendo à consulta de valores tabelados relativos ao número máximo de horas de sol (n), função da latitude e do mês do ano, e ao índice de calor (i) função da temperatura média mensal (T). A evapotranspiração potencial mensal (ETP, em mm) foi obtida com a aplicação da equação [4.6], sendo ETPd a evapotranspiração potencial diária e d o número de dias do mês.

$$ETP = ETPd \cdot \frac{n}{12} \cdot \frac{d}{30} \cdot d \quad [4.6]$$

Os resultados para o ano hidrológico médio 1981-2010 e para os anos hidrológicos 2010/11 e 2011/12 são apresentados na Tabela 4.15, Tabela 4.16 e Tabela 4.17, respetivamente.

Tabela 4.15 - Determinação da evapotranspiração potencial mensal (mm) para o período 1981-2010, com base em registos de IPMA (2013).

Mês	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
T (°C)	17.3	13.3	11.0	9.9	11.0	13.3	14.5	16.9	20.3	22.0	21.9	20.7
i	6.55	4.40	3.30	2.82	3.30	4.40	5.01	6.32	8.35	9.42	9.36	8.59
I	71.8											
ETPd	2.22	1.48	1.06	0.89	1.06	1.48	1.66	2.14	2.90	3.30	3.28	3.00
n	11.2	10.0	9.4	9.7	10.6	12.0	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5
ETP (mm)	66.4	37.0	26.6	23.1	24.5	47.4	55.2	82.3	108.6	129.5	120.0	93.8

T - temperatura; i - índice de calor mensal; I - índice de calor anual; ETPd - evapotranspiração potencial diária; n - número máximo de horas de sol; ETP - evapotranspiração potencial mensal

Tabela 4.16 - Determinação da evapotranspiração potencial mensal (mm) para o ano 2010/11, com base em registos de IM (2010a; 2010b; 2010c; 2011a; 2011b; 2011d; 2011e; 2011f; 2011g; 2011h; 2011i; 2011l).

Mês	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
T (°C)	16.9	13.8	9.6	9.0	11.1	14.3	18.9	20.6	24.5	23.8	23.4	22.2
i	6.32	4.65	2.68	2.44	3.35	4.91	7.49	8.53	11.09	10.61	10.34	9.55
I	82.0											
ETPd	1.98	1.42	0.71	0.66	0.96	1.52	2.48	2.89	3.90	3.76	3.68	3.32
n	11.2	10.0	9.4	9.7	10.6	12.0	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5
ETP (mm)	59.2	35.5	17.9	17.1	22.2	48.7	82.5	111.0	146.3	147.5	134.6	103.6

T - temperatura; i - índice de calor mensal; I - índice de calor anual; ETPd - evapotranspiração potencial diária; n - número máximo de horas de sol; ETP - evapotranspiração potencial mensal

Tabela 4.17 - Determinação da evapotranspiração potencial mensal (mm) para o ano 2011/12, com base em registos de IM (2011c; 2011j; 2011k; 2012b; 2012c; 2012d; 2012e; 2012f; 2012g; 2012h; 2012i; 2012j).

Mês	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
T (°C)	20.3	14.4	8.6	9.4	10.5	14.8	13.7	21.6	23.4	25.2	22.7	23.2
i	8.35	4.96	2.27	2.60	3.08	5.17	4.60	9.16	10.34	11.58	9.88	10.21
I	82.2											
ETPd	2.82	1.54	0.61	0.69	0.86	1.62	1.40	3.13	3.68	4.08	3.48	3.64
n	11.2	10.0	9.4	9.7	10.6	12.0	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5
ETP (mm)	84.3	38.5	15.4	17.9	21.3	51.9	46.6	120.4	138.0	160.1	127.3	113.8

T - temperatura; i - índice de calor mensal; I - índice de calor anual; ETPd - evapotranspiração potencial diária; n - número máximo de horas de sol; ETP - evapotranspiração potencial mensal

Procedeu-se à realização do balanço hídrico sequencial ao nível do solo, através do método de Thornthwaite & Mather (1955), usando os dados de precipitação atmosférica (apresentados em 2.3) e de ETP para obtenção da ETR. Tendo em conta a variabilidade do tipo de solo existente nas áreas de estudo (identificado no subcapítulo 2.8) e a sua espessura, o tipo de vegetação (referido em 2.8) e o desenvolvimento da rede de drenagem (analisado em 2.4), assume-se para a reserva de água utilizável pelas plantas (equiparável à capacidade de campo – Cc) valores de 50 e 100 mm para os locais de maior e menor infiltração, respetivamente. No ano hidrológico médio com base em registos de 1981-2010 e no ano hidrológico 2010/11, considera-se que no início de outubro o volume de água armazenada é nulo. O mesmo acontece no ano hidrológico de 2011/12, como consequência dos resultados de setembro de 2011. O valor de ETR (mm) é menor ou igual a ETP, sendo obtido pela diferença entre a evapotranspiração potencial (mm) e o défice hídrico (DH, em mm), pela equação [4.7].

$$ETR = ETP - DH \quad [4.7]$$

Os resultados obtidos em ambas as bacias hidrográficas estão sintetizados na Tabela 4.18 a Tabela 4.21 e na Figura 4.26 e na Figura 4.27.

Tabela 4.18 - Balanço hídrico sequencial ao nível do solo (mm) na MhM, para Cc = 100 mm.

1981-2010	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Anual
P	128.4	129.8	138.7	118.6	94.2	72.1	96.0	75.5	35.8	12.0	15.7	56.9	973.6
ETP	66.4	37.0	26.6	23.1	24.5	47.4	55.2	82.3	108.6	129.5	120.0	93.8	814.2
P-ETP	62.0	92.8	112.1	95.5	69.7	24.7	40.8	-6.8	-72.8	-117.5	-104.2	-36.8	
Cc	62.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	93.2	20.5	0.0	0.0	0.0	
ΔCc	62.0	38.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-6.8	-72.8	-20.5	0.0	0.0	
SH	0.0	54.8	112.1	95.5	69.7	24.7	40.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	397.5
DH	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	97.1	104.2	36.8	
ETR	66.4	37.0	26.6	23.1	24.5	47.4	55.2	82.3	108.6	32.4	15.7	56.9	576.1

2010/11	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Anual
P	167.6	130.2	165.6	99.5	114.1	59.7	62.2	41.1	0.3	1.1	12.5	39.7	893.5
ETP	59.2	35.5	17.9	17.1	22.2	48.7	82.5	111.0	146.3	147.5	134.6	103.6	926.0
P-ETP	108.4	94.7	147.7	82.4	91.9	11.0	-20.3	-69.9	-145.9	-146.4	-122.1	-64.0	
Cc	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	79.7	9.8	0.0	0.0	0.0	0.0	
ΔCc	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-20.3	-69.9	-9.8	0.0	0.0	0.0	
SH	8.4	94.7	147.7	82.4	91.9	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	436.1
DH	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	136.1	146.4	122.1	64.0	
ETR	59.2	35.5	17.9	17.1	22.2	48.7	82.5	111.0	10.2	1.1	12.5	39.7	457.4

2011/12	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Anual
P	50.4	180.7	57.4	25.1	2.4	13.7	111.6	103.1	20.4	1.6	20.3	54.5	641.3
ETP	84.3	38.5	15.4	17.9	21.3	51.9	46.6	120.4	138.0	160.1	127.3	113.8	935.3
P-ETP	-33.9	142.2	42.0	7.1	-18.9	-38.2	65.1	-17.3	-117.6	-158.5	-106.9	-59.2	
Cc	0.0	100.0	100.0	100.0	81.1	43.0	100.0	82.7	0.0	0.0	0.0	0.0	
ΔCc	0.0	100.0	0.0	0.0	-18.9	-38.2	57.0	-17.3	-82.7	0.0	0.0	0.0	
SH	0.0	42.2	42.0	7.1	0.0	0.0	8.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.4
DH	33.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	34.9	158.5	106.9	59.2	
ETR	50.4	38.5	15.4	17.9	21.3	51.9	46.6	120.4	103.1	1.6	20.3	54.5	542.0

P - precipitação; ETP - evapotranspiração potencial; Cc - Capacidade de campo; SH - excedente hídrico; DH - défice hídrico; ETR - evapotranspiração real

Tabela 4.19 - Balanço hídrico sequencial ao nível do solo (mm) na MhM, para Cc = 50 mm.

1981-2010	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Anual
P	128.4	129.8	138.7	118.6	94.2	72.1	96.0	75.5	35.8	12.0	15.7	56.9	973.6
ETP	66.4	37.0	26.6	23.1	24.5	47.4	55.2	82.3	108.6	129.5	120.0	93.8	814.2
P-ETP	62.0	92.8	112.1	95.5	69.7	24.7	40.8	-6.8	-72.8	-117.5	-104.2	-36.8	
Cc	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	43.2	0.0	0.0	0.0	0.0	
ΔCc	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-6.8	-43.2	0.0	0.0	0.0	
SH	12.0	92.8	112.1	95.5	69.7	24.7	40.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	447.5
DH	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.5	117.5	104.2	36.8	
ETR	66.4	37.0	26.6	23.1	24.5	47.4	55.2	82.3	79.1	12.0	15.7	56.9	526.1

2010/11	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Anual
P	167.6	130.2	165.6	99.5	114.1	59.7	62.2	41.1	0.3	1.1	12.5	39.7	893.5
ETP	59.2	35.5	17.9	17.1	22.2	48.7	82.5	111.0	146.3	147.5	134.6	103.6	926.0
P-ETP	108.4	94.7	147.7	82.4	91.9	11.0	-20.3	-69.9	-145.9	-146.4	-122.1	-64.0	
Cc	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	29.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
ΔCc	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-20.3	-29.7	0.0	0.0	0.0	0.0	
SH	58.4	94.7	147.7	82.4	91.9	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	486.1
DH	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.2	145.9	146.4	122.1	64.0	
ETR	59.2	35.5	17.9	17.1	22.2	48.7	82.5	70.8	0.3	1.1	12.5	39.7	407.4

2011/12	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Anual
P	50.4	180.7	57.4	25.1	2.4	13.7	111.6	103.1	20.4	1.6	20.3	54.5	641.3
ETP	84.3	38.5	15.4	17.9	21.3	51.9	46.6	120.4	138.0	160.1	127.3	113.8	935.3
P-ETP	-33.9	142.2	42.0	7.1	-18.9	-38.2	65.1	-17.3	-117.6	-158.5	-106.9	-59.2	
Cc	0.0	50.0	50.0	50.0	31.1	0.0	50.0	32.7	0.0	0.0	0.0	0.0	
ΔCc	0.0	50.0	0.0	0.0	-18.9	-31.1	50.0	-17.3	-32.7	0.0	0.0	0.0	
SH	0.0	92.2	42.0	7.1	0.0	0.0	15.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	156.4
DH	33.9	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	84.9	158.5	106.9	59.2	
ETR	50.4	38.5	15.4	17.9	21.3	44.9	46.6	120.4	53.1	1.6	20.3	54.5	484.9

P - precipitação; ETP - evapotranspiração potencial; Cc - Capacidade de campo; SH - excedente hídrico; DH - déficit hídrico; ETR - evapotranspiração real

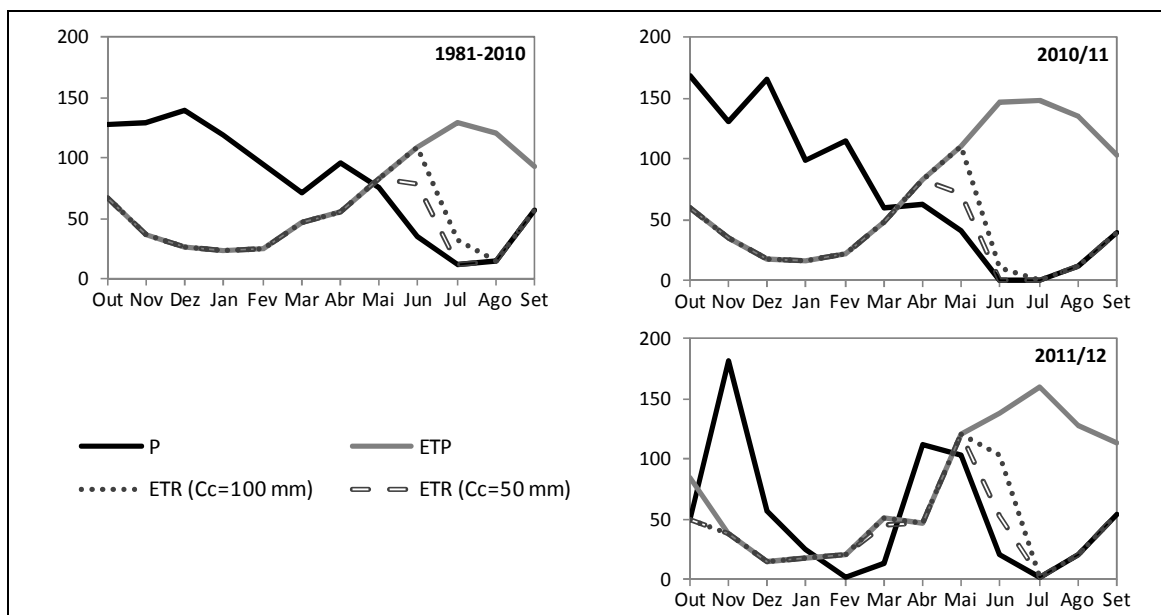


Figura 4.26 - Balanços hídricos sequenciais ao nível do solo (mm) para a MhM.

Os balanços hídricos sequenciais indicam valores anuais de ETR variáveis entre 407 e 576 mm na microbacia hidrográfica de Montouro, correspondendo para o ano médio a 54-59 % da precipitação até aos 76 a 85 % no ano de menor precipitação (2011/2012). Os excedentes hídricos (SH) têm valores médios de 398 a 448 mm e mínimos de 99 a 156 mm para a MhM.

Tabela 4.20 - Balanço hídrico sequencial ao nível do solo (mm) na BhF, para Cc = 100 mm.

1981-2010	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Anual
P	132.7	134.2	143.4	122.6	97.4	74.5	99.3	78.1	37.0	12.4	16.3	58.9	1006.8
ETP	66.4	37.0	26.6	23.1	24.5	47.4	55.2	82.3	108.6	129.5	120.0	93.8	814.2
P-ETP	66.4	97.2	116.8	99.5	72.9	27.1	44.1	-4.2	-71.6	-117.1	-103.7	-34.9	
Cc	66.4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	95.8	24.3	0.0	0.0	0.0	
ΔCc	66.4	33.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-4.2	-71.6	-24.3	0.0	0.0	
SH	0.0	63.6	116.8	99.5	72.9	27.1	44.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	424.1
DH	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	92.9	103.7	34.9	
ETR	66.4	37.0	26.6	23.1	24.5	47.4	55.2	82.3	108.6	36.6	16.3	58.9	582.8

2010/11	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Anual
P	173.3	134.7	171.3	102.8	118.0	61.7	64.3	42.5	0.3	1.1	13.0	41.0	924.0
ETP	59.2	35.5	17.9	17.1	22.2	48.7	82.5	111.0	146.3	147.5	134.6	103.6	926.0
P-ETP	114.1	99.2	153.4	85.8	95.8	13.0	-18.1	-68.5	-145.9	-146.4	-121.6	-62.6	
Cc	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	81.9	13.3	0.0	0.0	0.0	0.0	
ΔCc	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-18.1	-68.5	-13.3	0.0	0.0	0.0	
SH	14.1	99.2	153.4	85.8	95.8	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	461.2
DH	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	132.6	146.4	121.6	62.6	
ETR	59.2	35.5	17.9	17.1	22.2	48.7	82.5	111.0	13.7	1.1	13.0	41.0	462.8

2011/12	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Anual
P	52.2	186.8	59.3	25.9	2.5	14.2	115.5	106.6	21.1	1.7	21.0	56.4	663.2
ETP	84.3	38.5	15.4	17.9	21.3	51.9	46.6	120.4	138.0	160.1	127.3	113.8	935.3
P-ETP	-32.2	148.3	44.0	8.0	-18.8	-37.7	68.9	-13.8	-116.9	-158.4	-106.2	-57.4	
Cc	0.0	100.0	100.0	100.0	81.2	43.5	100.0	86.2	0.0	0.0	0.0	0.0	
ΔCc	0.0	100.0	0.0	0.0	-18.8	-37.7	56.5	-13.8	-86.2	0.0	0.0	0.0	
SH	0.0	48.3	44.0	8.0	0.0	0.0	12.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	112.7
DH	32.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.7	158.4	106.2	57.4	
ETR	52.2	38.5	15.4	17.9	21.3	51.9	46.6	120.4	107.3	1.7	21.0	56.4	550.5

P - precipitação; ETP - evapotranspiração potencial; Cc - Capacidade de campo; SH - excedente hídrico; DH - déficit hídrico; ETR - evapotranspiração real

No caso da bacia hidrográfica de Ferverça os resultados anuais de evapotranspiração real situam-se num intervalo entre 413 e 583 mm, tendo o ano médio 53 a 58 % de ETR relativamente à precipitação, que no ano 2011/2012 dispara para os 74 a 83 %, representando perdas significativas. Relativamente aos excedentes hídricos (SH) os mínimos são de 113 a 169 mm e o ano médio apresenta variação entre 424 a 474 mm.

Em ambas as áreas de estudo verifica-se que é nos meses de novembro a abril, outubro a abril e outubro a março que habitualmente ocorrem excedentes, no entanto, em 2011/2012 o período reduziu para os meses de novembro a janeiro e abril, com valores significativamente baixos. Os excedentes hídricos correspondem ao somatório das parcelas da escorrência superficial e infiltração (aproximadamente igual à recarga aquífera).

Tabela 4.21 - Balanço hídrico sequencial ao nível do solo (mm) na BhF, para Cc = 50 mm.

1981-2010	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Anual
P	132.7	134.2	143.4	122.6	97.4	74.5	99.3	78.1	37.0	12.4	16.3	58.9	1006.8
ETP	66.4	37.0	26.6	23.1	24.5	47.4	55.2	82.3	108.6	129.5	120.0	93.8	814.2
P-ETP	66.4	97.2	116.8	99.5	72.9	27.1	44.1	-4.2	-71.6	-117.1	-103.7	-34.9	
Cc	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	45.8	0.0	0.0	0.0	0.0	
ΔCc	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-4.2	-45.8	0.0	0.0	0.0	
SH	16.4	97.2	116.8	99.5	72.9	27.1	44.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	474.1
DH	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.7	117.1	103.7	34.9	
ETR	66.4	37.0	26.6	23.1	24.5	47.4	55.2	82.3	82.9	12.4	16.3	58.9	532.8

2010/11	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Anual
P	173.3	134.7	171.3	102.8	118.0	61.7	64.3	42.5	0.3	1.1	13.0	41.0	924.0
ETP	59.2	35.5	17.9	17.1	22.2	48.7	82.5	111.0	146.3	147.5	134.6	103.6	926.0
P-ETP	114.1	99.2	153.4	85.8	95.8	13.0	-18.1	-68.5	-145.9	-146.4	-121.6	-62.6	
Cc	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	31.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
ΔCc	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-18.1	-31.9	0.0	0.0	0.0	0.0	
SH	64.1	99.2	153.4	85.8	95.8	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	511.2
DH	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	36.7	145.9	146.4	121.6	62.6	
ETR	59.2	35.5	17.9	17.1	22.2	48.7	82.5	74.4	0.3	1.1	13.0	41.0	412.8

2011/12	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Anual
P	52.2	186.8	59.3	25.9	2.5	14.2	115.5	106.6	21.1	1.7	21.0	56.4	663.2
ETP	84.3	38.5	15.4	17.9	21.3	51.9	46.6	120.4	138.0	160.1	127.3	113.8	935.3
P-ETP	-32.2	148.3	44.0	8.0	-18.8	-37.7	68.9	-13.8	-116.9	-158.4	-106.2	-57.4	
Cc	0.0	50.0	50.0	50.0	31.2	0.0	50.0	36.2	0.0	0.0	0.0	0.0	
ΔCc	0.0	50.0	0.0	0.0	-18.8	-31.2	50.0	-13.8	-36.2	0.0	0.0	0.0	
SH	0.0	98.3	44.0	8.0	0.0	0.0	18.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	169.2
DH	32.2	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	0.0	0.0	80.7	158.4	106.2	57.4	
ETR	52.2	38.5	15.4	17.9	21.3	45.4	46.6	120.4	57.3	1.7	21.0	56.4	494.0

P - precipitação; ETP - evapotranspiração potencial; Cc - Capacidade de campo; SH - excedente hídrico; DH - déficit hídrico; ETR - evapotranspiração real

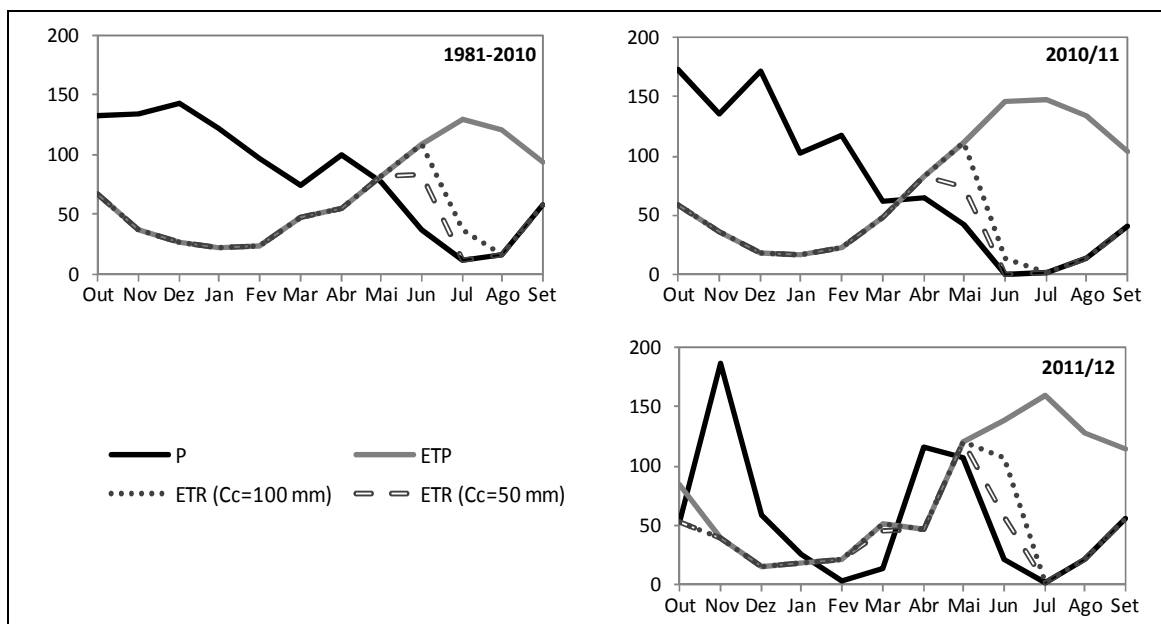


Figura 4.27 - Balanços hídricos sequenciais ao nível do solo (mm) para a BhF.

A aplicação da equação [4.5] possibilita a determinação aproximada da recarga subterrânea (correspondente à quase totalidade de ΔS). No entanto, é necessário estimar ou determinar o

escoamento superficial. Esta avaliação teve em conta o tipo de sistema aquífero (O2 na MhM e O1, O5, O30 e O3 na BhF) e as suas propriedades, assim como alguns valores referidos por outros autores para os aquíferos em estudo.

Relativamente à microbacia hidrográfica de Montouro, estima-se um escoamento superficial na ordem dos 30 % da precipitação, sensivelmente semelhante ao assumido por Condesso de Melo (2002). Em 2011/2012, dadas as menores precipitações, considera-se que a recarga corresponde a 15 % da precipitação, valor mínimo obtido por Marques da Silva (1990), o que indica uma infiltração profunda entre 15 a 20 % da precipitação média anual.

Na bacia hidrográfica de Ferveça, para o Sistema aquífero Quaternário de Aveiro (O1), Ferreira (1995), citado em Ordens (2007), estimou a taxa de infiltração em 70 a 80 % do excedente hídrico, tendo-se calculado a recarga assumindo o valor de 70 %. Para os Sistemas aquíferos Tentúgal (O5) e Viso - Queridas (O30) foi assumido um comportamento semelhante ao do Sistema aquífero Cretácico de Aveiro (O2) e, finalmente, para o Sistema aquífero Cárstico da Bairrada (O3) considerou-se a infiltração em 80 % do excedente hídrico.

A Tabela 4.22 resume os resultados obtidos para a recarga em cada bacia hidrográfica. A sua análise permite constatar que na MhM a recarga aquífera em 2011/2012 equivale a cerca de 15 % da precipitação atmosférica anual, sendo no ano médio correspondente a 11-16 % e de 19 a 24 % em 2010/2011, ligeiramente acima de outros valores apresentados para a zona.

Obtiveram-se valores semelhantes no caso de O5 e O30 na bacia hidrográfica de Ferveça. A recarga determinada para O1 é elevada, mas adequada às propriedades das unidades aquíferas, e, apesar de um pouco superior ao máximo de 269 mm indicado por Peixinho de Cristo (1985), é análoga à obtida por Ordens (2007). Em O3 (Cárstico da Bairrada) temos 34 a 44 % da precipitação a direcionar-se para a recarga aquífera, com valores pertencentes ao intervalo de 300 a 450 mm (Peixinho de Cristo, 1985). Constitui exceção os valores obtidos para 2011/2012 com apenas 12 a 20 % da água precipitada a evoluir para a recarga aquífera.

Tabela 4.22 - Cálculo da recarga aquífera anual através do balanço hídrico pelo método de Penman-Grindley (considera-se que a recarga é aproximadamente igual a ΔS).

Ano	Cc (mm)	MhM				BhF						
		P (mm)	ETR (mm)	SH (mm)	ΔS (mm)	P (mm)	ETR (mm)	SH (mm)	ΔS (mm)			
					O2				O1	O5	O30	O3
1981-2010	50	973.6	526.1	447.5	155.5	1006.8	532.8	474.1	331.8	172.0	379.2	
	100		576.1	397.5	105.5		582.8	424.1	296.8	122.0	339.2	
2010/2011	50	893.5	407.4	486.1	218.0	924.0	412.8	511.2	357.8	234.0	409.0	
	100		457.4	436.1	168.0		462.8	461.2	322.8	184.0	369.0	
2011/2012	50	641.3	484.9	156.4	96.2	663.2	494.0	169.2	118.4	99.5	135.3	
	100		542.0	99.4			550.5	112.7	78.9		90.2	

4.5.2 - Método do balanço de massa de cloretos

O cloreto meteórico é um excelente traçador do movimento da água no subsolo (Custodio & Llamas, 1983; Healy, 2010) devido ao seu comportamento conservativo quando em solução aquosa resultante da elevada constante de solubilidade e por não acompanhar o solvente na mudança de fase (Azevedo, 1998).

Este método, de utilização frequente na determinação da recarga das massas de água subterrânea, tem por base o comportamento geoquímico do ião, mas a sua aplicabilidade e validade depende da verificação dos seguintes requisitos: a origem do ião cloreto tem de ser a água da chuva ou a deposição seca, não ocorrendo nenhuma outra origem do ião no sistema aquífero; no intervalo de tempo em análise considera-se constante a entrada de cloreto na água da chuva e na deposição seca; a escorrência superficial é pouco significativa e a água da precipitação sofre evaporação ou promove a recarga da água subterrânea e, por fim, não existe evaporação de água subterrânea a montante dos seus pontos de amostragem.

Os dados necessários são a precipitação média anual (P , em mm), a concentração média de cloreto na água chuva (C_P , em mg/L) ou na deposição seca (C_{DS} , em mg/L) e a concentração média de cloretos na água subterrânea (C_{AS} , em mg/L). A recarga média anual (q_R , em mm) determinada com base no método de balanço de massa de cloretos, é obtida pela equação [4.8], proposta por Allison & Hughes (1978; 1983).

$$q_R = \frac{P (C_P + C_{DS})}{C_{AS}} \quad [4.8]$$

Este método irá ser aplicado para a estimativa da recarga que ocorre no interior da MhM, considerando-se o valor médio da concentração de cloretos nos poços; excetuaram-se os valores da água da nascente, que apresenta valores de Cl muito superiores devido a circulação profunda possivelmente contactando com formações evaporíticas (como referido em 4.4 e também como será discutido no capítulo 5) e para a qual o método não tem aplicabilidade. Na BhF o método será implementado incluindo a totalidade dos poços, mas distinguindo aqueles cuja água é bicarbonatada cálcica (conforme classificação em 5.3) dos restantes. Apresenta-se, também, a média da concentração de Cl, bem como o teor mínimo e máximo.

Relativamente às concentrações de cloreto na água da chuva, estas foram obtidas através da consulta do trabalho de Condesso de Melo (2002), que durante um período de 5 anos, entre 1997 e 2001, monitorizou mensalmente o quimismo da água da chuva em três locais distintos, nomeadamente, Aveiro, Albergaria-a-Velha e Oliveira do Bairro. As concentrações de cloreto medidas neste último local apresentam uma média de 3.36 mg/L (incluindo a deposição seca), sendo consideradas representativas para as áreas de estudo devido à sua proximidade.

Os dados de precipitação anual são os mesmos utilizados nos cálculos pelo método de Penman-Grindley.

Na Tabela 4.23 consta a síntese da quantificação da recarga em cada bacia hidrográfica, em função dos vários teores de cloreto das águas amostradas. Para o ano médio de 1981-2010 utilizou-se a média dos teores de cloreto registados na água subterrânea em 2010/11 e 2011/12.

A recarga mínima apresenta valores demasiado pequenos que refletem ocorrência pontual de maiores concentrações de cloreto na água subterrânea, não sendo representativos. Considerando os valores médio e máximo de recarga, verifica-se para a MhM uma variação entre 78 e 252 mm, enquanto que para a BhF teremos na área com águas bicarbonatadas uma recarga de 90 a 310 mm e na restante área valores inferiores, na ordem de 60 a 168 mm.

Tabela 4.23 - Cálculo da recarga aquífera anual pelo método de balanço de massa de cloretos.

		Ano hidrológico	P (mm)	C _P (mg/L)	C _{AS} (mg/L)			q _R (mm)		
					MIN	μ	MAX	MIN	μ	MAX
MhM		2010/2011	893.5		14.00	27.14	42.99	69.84	110.61	214.51
		2011/2012	641.3	3.36	11.93	27.61	47.99	44.91	78.03	180.64
		1981-2010	973.6		12.96	27.38	45.49	71.92	119.49	252.38
BhF	águas bicarbonatadas cálcicas	2010/2011	924.0		15.00	24.99	38.49	80.66	124.22	207.04
		2011/2012	663.2	3.36	7.20	24.70	40.49	55.04	90.22	309.66
		1981-2010	1006.8		11.10	24.85	39.49	85.67	136.16	304.89
	restantes águas	2010/2011	924.0		18.49	34.03	51.98	59.72	91.22	167.87
		2011/2012	663.2	3.36	21.99	37.06	70.48	31.62	60.13	101.32
		1981-2010	1006.8		20.24	35.55	61.23	55.25	95.17	167.11

MIN - valor mínimo; μ - média; MAX - valor máximo

4.5.3 - Balanço de cloretos

Uma outra metodologia para a estimativa da recarga é a proposta por Falkland & Custodio (1991), expressa pela equação [4.9], onde P é a precipitação (em valores percentuais), R (%) é a escorrência superficial, S (%) é a recarga, C_P (mg/L) é a concentração média de cloreto na água chuva, C_R (mg/L) é a concentração média de cloreto na escorrência superficial, C_S (mg/L) é a concentração média de cloreto na água de recarga (possível de quantificar pela análise da água das exurgências), BP é a fração de cloreto de corpos externos (por exemplo, brisas e poeiras ricas em aerossóis marinhos).

$$P \cdot C_P - R \cdot C_R - S \cdot C_S + BP - \text{erro} = 0 \quad [4.9]$$

Nas áreas em estudo a aplicação deste método só é possível para a bacia hidrográfica de Ferverença, onde se efetuaram duas determinações de concentrações de cloreto em linhas de água, com valor médio de 28.74 mg/L. Desprezando a fração BP (cloreto de corpos externos) e admitindo erro nulo, teremos uma recarga média de cerca de 2 %, com um máximo de aproximadamente 4 % (Tabela 4.24) da precipitação atmosférica total. Um valor muito baixo, irrealista, e que não traduz o comportamento observado.

Tabela 4.24 - Cálculo da recarga (%) do aquífero associado à exurgência Olhos da Ferverença pelo método de balanço de cloretos.

P (%)	C _P (mg/L)	R (%)	C _R (mg/L)	C _S (mg/L)	S (%)
			23.99		3.77
100.00	3.36	10.00	33.49	25.49	0.04
			28.74		1.91

Custodio & Llamas (1983) apresentaram uma fórmula mais simplificada que possibilita a quantificação da infiltração profunda (I), assumida equivalente à recarga aquífera, através da equação [4.10].

$$\frac{I}{P} \approx \frac{C_P}{C_S} \quad [4.10]$$

O resultado de recarga aquífera de cerca de 13 % da precipitação atmosférica (Tabela 4.25), apesar de um pouco superior ao anteriormente obtido, é ainda algo reduzido.

Tabela 4.25 - Cálculo da recarga (%) do aquífero associado à exsurgência Olhos da Ferverença pela forma simplificada do método de balanço de cloretos.

P (%)	C _P (mg/L)	C _S (mg/L)	I (%)
100.00	3.36	25.49	13.18

4.5.4 - Síntese dos resultados

Os resultados obtidos pelo método do balanço de cloretos são no geral muito reduzidos e por isso considerados pouco representativos da recarga aquífera local. Este facto decorrerá possivelmente devido ao valor reduzido da concentração de cloretos na água da precipitação, cuja influência é significativa nos cálculos. A comparação de resultados limitar-se-á às estimativas pelos métodos de Penman-Grindley e de balanço de massa de cloretos; e excluirá o ano hidrológico 2011/2012 devido às suas características atípicas relativamente à precipitação atmosférica anual e, conseqüentemente, da recarga aquífera.

Desta análise comparativa, apresenta-se uma estimativa de valor de recarga anual em cada bacia hidrográfica (Tabela 4.26 e Tabela 4.27). Os valores apurados foram obtidos através da média dos valores dos intervalos estimados (no caso do método de Penman-Grindley), ou selecionados de acordo com o valor mais razoável (método de balanço de massa de cloretos).

No caso da microbacia hidrográfica de Montouro admite-se uma recarga média anual na ordem de 170 mm, correspondente a, aproximadamente, 18 % da precipitação anual.

Relativamente à bacia hidrográfica de Ferverença, indica-se uma recarga média anual de, aproximadamente, 340 mm para o Cársico da Bairrada e de, cerca de, 203 mm para as unidades hidrogeológicas do Quaternário e Cretácico (O1, O5 e O30), equivalente a 35 e 21 % da precipitação anual, respetivamente.

Estes valores são aceitáveis e da mesma grandeza das estimativas efetuadas por outros autores e anteriormente enunciadas neste capítulo.

Tabela 4.26 - Estimativa da recarga aquífera média anual na microbacia hidrográfica de Montouro.

Método	Recarga (mm)		
	Intervalos estimados	Valor apurado	Final
Penman-Grindley	130 - 193	162	170
Balanço de massa de cloretos	2010/2011 1981-2010	111 - 215 119 - 252	
		163 186	

Tabela 4.27 - Estimativa da recarga média anual na bacia hidrográfica de Fervença.

Método		Recarga Cársico da Bairrada (mm)			Recarga Quaternário + Cretácico (mm)			
		Intervalos estimados	Valor apurado	Final	Intervalos estimados	Valor apurado		Final
Penman-Grindley		359 - 389	374	340	314 - 340	327	237	203
					147 - 209	147		
Balanço de massa de cloretos	2010/2011	124 - 207	305		91 - 168	168		
	1981-2010	136 - 305		95 - 167				

Capítulo 5 - Hidroquímica

Cada massa de água tem uma individualidade físico-química muito própria, havendo águas com composições químicas muito semelhantes, mas apresentando pormenores na sua estrutura que as diferenciam (Simões, 1993). A variabilidade do quimismo da água subterrânea é o resultado das várias interações físicas, químicas e biológicas que se processam no decorrer do seu percurso desde a origem até à circulação e armazenamento profundos. A composição química da água pode ser usada para avaliar os processos hidrogeoquímicos (dissolução, precipitação, trocas iónicas, etc.) ao longo do fluxo subterrâneo (Weight & Sonderegger, 2001). Do mesmo modo, águas com diferentes proveniências, percursos e interações terão assinaturas químicas distintas, sendo possível a sua integração em grupos de águas com histórias semelhantes (Castilho, 2008).

A assinatura hidrogeoquímica será tanto mais marcante quanto maior for o tempo de residência da água no meio aquífero e quanto mais solúveis forem os minerais presentes (Sena, 2007). A composição química da água subterrânea pode refletir ainda o tipo e uso do solo e as atividades antrópicas nos locais de recarga.

A interpretação, qualitativa e quantitativa, da presença e origem dos parâmetros e elementos físico-químicos de uma água subterrânea objetiva-se, necessariamente, para a caracterização: (1) da origem do próprio fluido e (2) das fontes, dos processos (interação água-meio) e dos fatores de incorporação e evolução daqueles elementos constituintes no corpo hídrico (Azevedo, 1998).

Hiscock (2005) elaborou uma representação das alterações comuns na fácies hidroquímica ao longo do fluxo da água subterrânea desde a área de recarga até à secção confinada ao meio aquífero, evidenciando os principais processos hidroquímicos, podendo estes não ser todos sequenciais (Figura 5.1).

Com recurso à amostragem e análise físico-química (*in situ* e laboratorial) pretende-se caracterizar com precisão os diferentes tipos de água, recorrendo a uma amostra pequena em volume para ser convenientemente transportada e suficientemente grande para os propósitos analíticos pretendidos (Clesceri *et al.*, 1998).

No presente capítulo é feita uma abordagem às metodologias de amostragem da água e aos métodos analíticos usados para medição dos parâmetros físico-químicos, em campo e em laboratório, no conjunto dos pontos de água selecionados nas áreas de estudo. Os resultados das análises químicas e dos parâmetros físico-químicos foram tratados estatisticamente, representados cartograficamente e utilizados na caracterização hidroquímica da água (classificação, determinação de índices hidrogeoquímicos e de índices de saturação de minerais - IS) por forma a facilitar a identificação dos processos hidrogeoquímicos decorrentes da circulação das águas nas zonas de estudo. São, igualmente, apresentados os resultados da determinação dum isótopo ambiental (trítio), permitindo a aplicação da hidrologia isotópica às áreas em estudo.

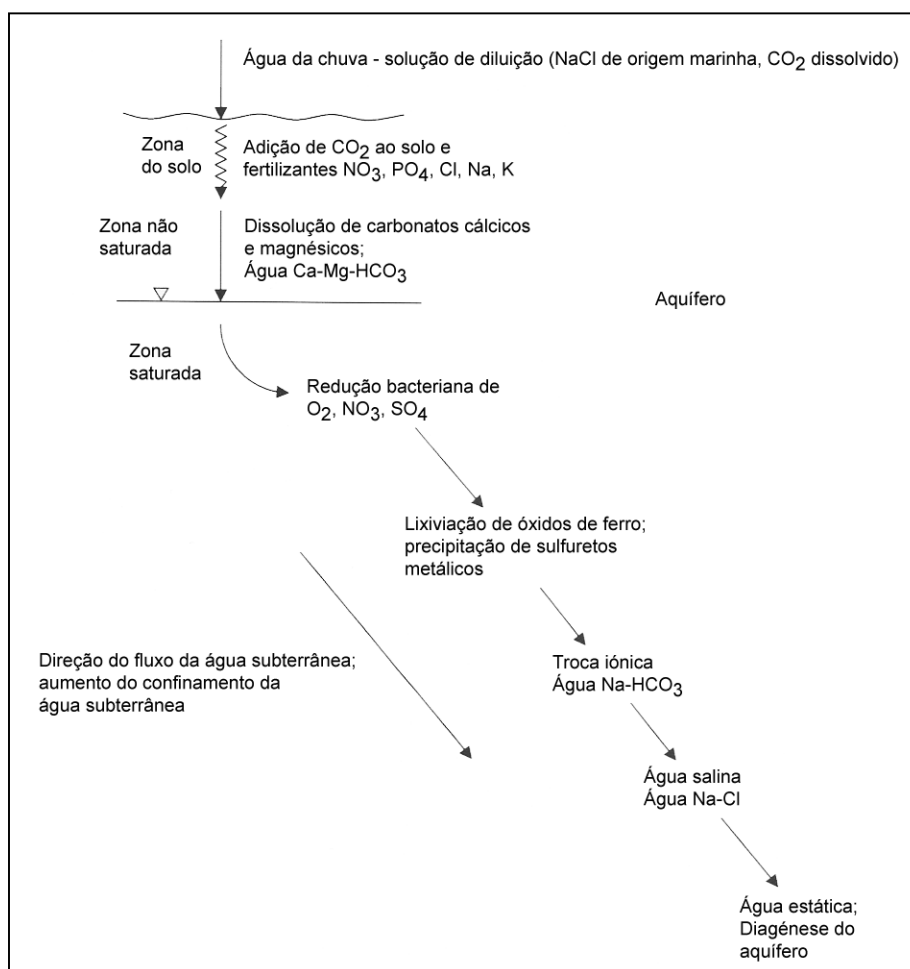


Figura 5.1 - Diagrama esquemático da evolução da água subterrânea (adaptado de Hiscock, 2005).

5.1 - Amostragem das águas e métodos analíticos

No caso de estudo de Montouro, realizaram-se anualmente nas épocas de inverno e verão, entre fevereiro de 2007 e maio de 2010, duas campanhas de monitorização e amostragem nos pontos de água localizados nas proximidades da nascente (M00), num total de 34 poços (P01 a P34) para além da nascente (Figura 5.2). Foi recolhida uma amostra de água em cada poço, sem prévio esvaziamento. Foram medidos parâmetros físico-químicos como pH, condutividade elétrica específica (SEC), oxigénio dissolvido, temperatura, salinidade, turbidez e Eh, num conjunto de quatro medidas por parâmetro para posterior cálculo da média e desvio padrão. O Eh foi medido com a sonda WTW, modelo pH325 (WTW - Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH, 1994) e a sonda multi-paramétrica DKK-TOA, modelo WQC-24 (DKK-TOA Corporation, 2004), mediu os restantes parâmetros. Este procedimento manteve-se nas campanhas subsequentes para um novo conjunto de pontos de água distribuídos espacialmente pela área da bacia hidrográfica; exceção para o Eh que a partir da campanha de 2011 foi medido com a sonda multi-paramétrica Eijkelkamp, modelo 18.28 (Eijkelkamp, 2003). Na Figura 5.3 apresenta-se a medição *in situ* dos vários parâmetros físico-químicos com os respetivos equipamentos.

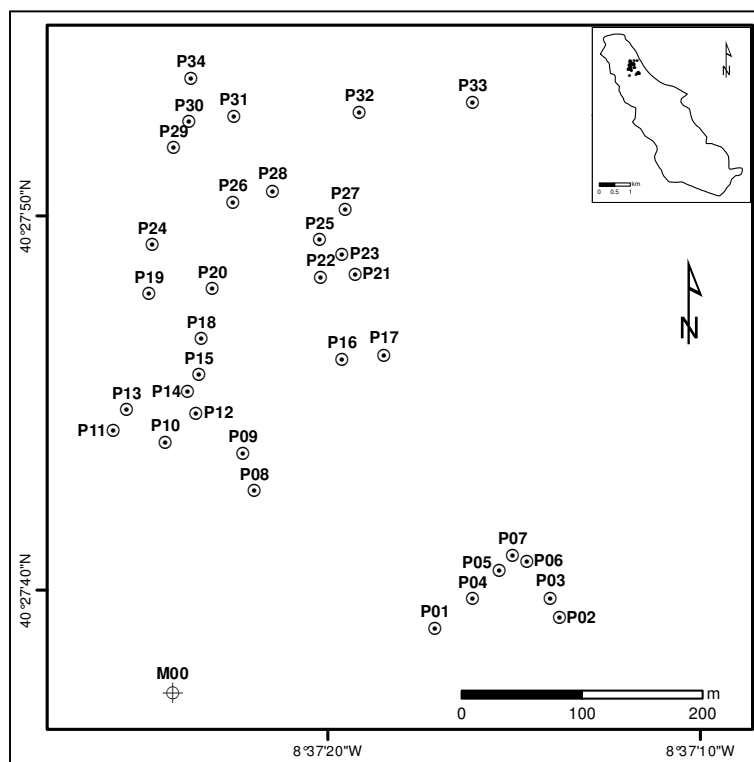


Figura 5.2 - Pontos de água monitorizados de 2007 a 2010 na envólves da nascente de Montouro (M00).



Figura 5.3 - Processos e equipamentos usados nas medições de campo.

Para realização das análises químicas de junho/julho de 2011 e fevereiro/abril de 2012 foram selecionados um total de 11 pontos de água, 10 poços e a nascente, distribuídos pela área da MhM (Figura 5.4).

Como referido (subcapítulo 4.2), a partir de julho de 2010 com a definição da MhM dos 20 poços inventariados (M00 a M19), alguns fazem parte do conjunto que vinha sendo monitorizado desde 2007: são os casos de P06, P22, P27, P32 e P33 que passaram a ter, respetivamente, as designações de M12, M13, M14, M15 e M16.

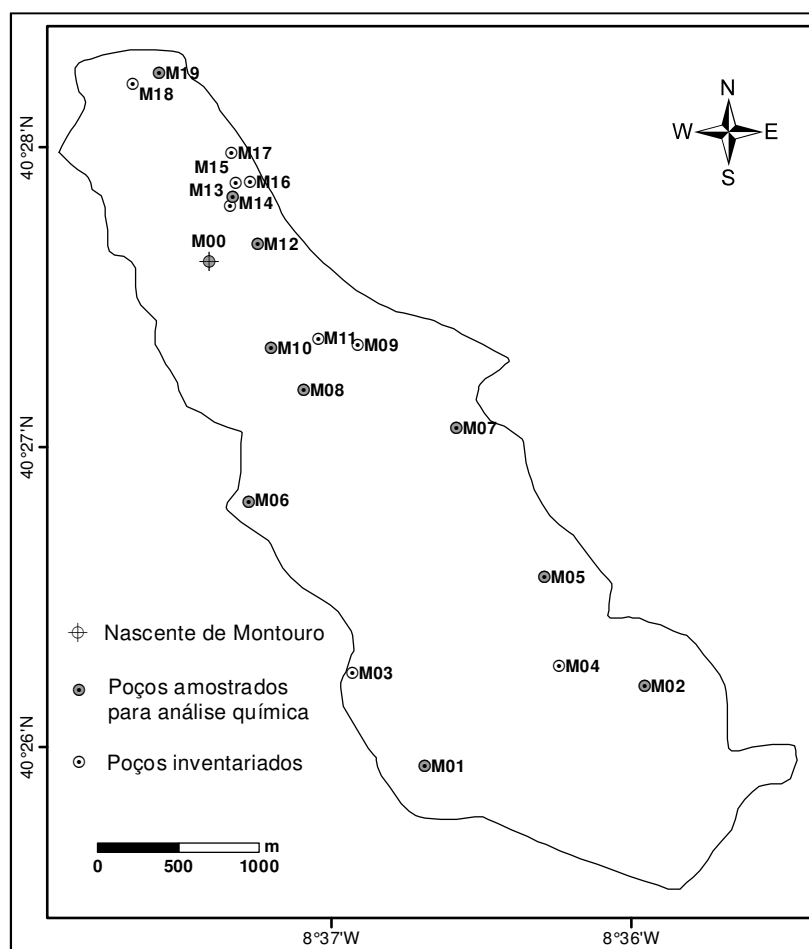


Figura 5.4 - Pontos de água amostrados na MhM.

Na bacia hidrográfica de Fervença, efetuaram-se duas campanhas de campo, a primeira em junho de 2011 e a segunda em fevereiro/março de 2012, com recolha de amostras para análise química em 20 poços, denominados F01 a F20 (Figura 5.5). Adotaram-se os mesmos procedimentos e, no local, determinaram-se os parâmetros anteriormente referidos usando as sondas multi-paramétricas DKK-TOA, modelo WQC-24 (DKK-TOA Corporation, 2004) e Eijkelkamp, modelo 18.28 (Eijkelkamp, 2003).

Em ambas as áreas de estudo, a seleção dos pontos a amostrar para realização das análises químicas levou em consideração não somente a distribuição espacial, mas teve também como objetivo a deteção de águas de diferentes origens.

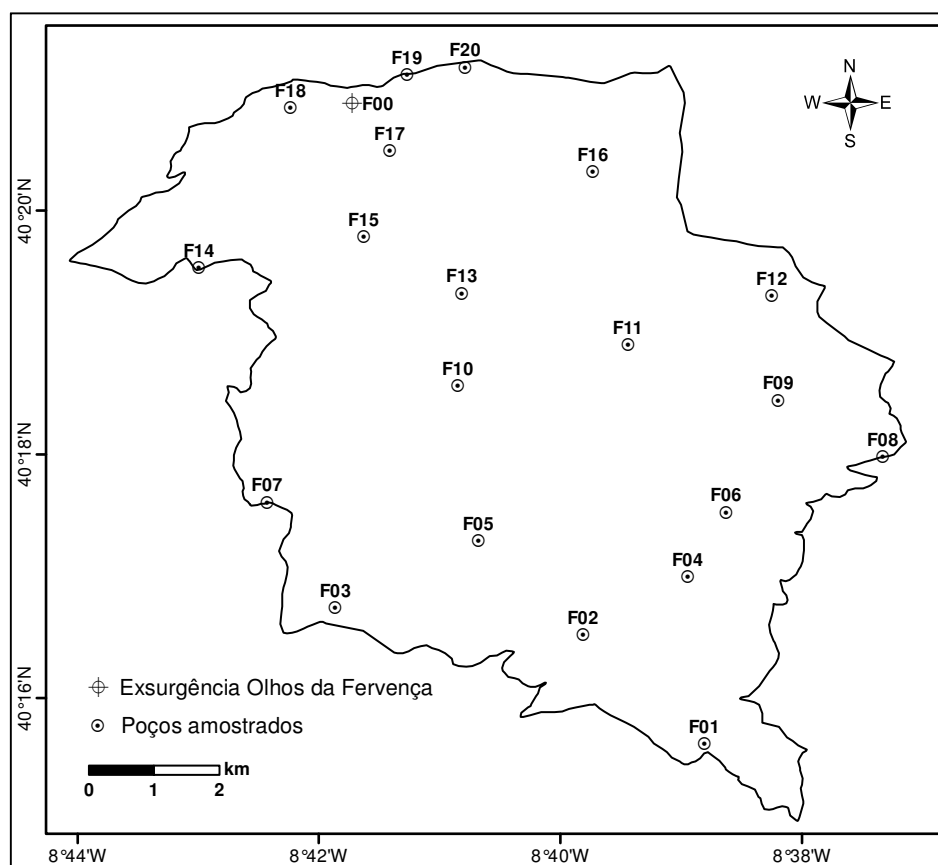


Figura 5.5 - Pontos de água amostrados na BhF.

A amostragem foi feita sem recurso a esvaziamento prévio, exceto no caso da nascente de Montouro nas colheitas de julho de 2011 e abril de 2012, cuja água foi recolhida após purga do poço (Figura 5.6 (a)), onde a água emerge (Figura 5.6 (b)).

A representatividade da água subterrânea é garantida quando a recolha de amostras em poços é feita após purga suficiente, geralmente com 3 a 10 volumes do poço (Clesceri *et al.*, 1998), mas em muitos casos 2 a 4 vezes é suficiente (Appelo & Postma, 2005), como tal, escolheram-se poços usados na rega agrícola, ou na pecuária, de modo a assegurar estas condições. De acrescentar que a campanha de amostragem no período de inverno (2012), decorreu num ano de seca em que se registaram precipitações muito abaixo do normal, o que obrigou à excecional rega dos campos, garantindo a renovação de água nos poços.

Em junho de 2013, efetuou-se uma nova amostragem nas duas nascentes (Montouro e Olhos de Fervença) e em dois poços, um de cada bacia hidrográfica, com o intuito principal de proceder à datação da água das nascentes. No entanto, fizeram-se simultaneamente novas análises químicas. O procedimento seguido para a recolha da água do poço de Montouro foi o mesmo, tendo-se também executado a purga prévia; em Olhos da Fervença iniciou-se e manteve-se a bombagem durante algum tempo, cerca de 15 minutos, para posteriormente se efetuar a amostragem (Figura 5.7).



(a)



(b)

Figura 5.6 - Purga do poço de Montouro (a) e amostragem da água no local de emergência da nascente (b).



Figura 5.7 - Bombagem do poço de Olhos da Ferverça e amostragem da água.

A água foi retirada dos poços com recurso a um amostrador e procedeu-se, o mais rápido possível, à quantificação da alcalinidade, através de titulação com ácido sulfúrico usando o titulador digital da Hach, método 8203 (Hach, 2006), de modo a minimizar a redução deste parâmetro por degaseificação do dióxido de carbono (Weight & Sonderegger, 2001). O procedimento pode ser visualizado na Figura 5.8.



Figura 5.8 - Determinação *in situ* da alcalinidade.

Todos os frascos usados para amostragem, foram previamente lavados em laboratório com ácido nítrico diluído e permaneceram embebidos no mesmo por um período de 24 horas, a fim de remover qualquer contaminante oxidável. Posteriormente, foram passados por água da torneira e finalmente estagiaram em água desmineralizada antes de colocados na estufa para secagem.

No campo, os frascos em polietileno de alta densidade (PEAD), com tampa dupla, foram passados por água do próprio ponto de água a amostrar e posteriormente cheios, evitando-se, assim, a formação de bolhas de ar. Por outro lado, eram guardados em arcas frigoríficas refrigeradas para os proteger do calor e em simultâneo do contacto direto com a luz solar. O volume de água recolhida por amostra foi de 1000 mL.

As amostras foram transportadas para o Laboratório Químico do Departamento Ciências da Terra, da Universidade de Coimbra onde foram realizadas as análises químicas.

Na chegada ao laboratório, procedeu-se imediatamente à filtração das amostras com filtros de membrana HA 0.45 μm da Milipore, colocados no respetivo porta filtros e seringa (Figura 5.9), de modo a eliminar sedimentos em suspensão. Acidificou-se uma fração de 100 mL de água com 150 μL de ácido nítrico a 65 %, para manter o pH inferior a 2.0 e minimizar a precipitação e a adsorção pelas paredes do frasco. Colocou-se no frigorífico a cerca de 4 $^{\circ}\text{C}$ para, posteriormente, se efetuar a determinação dos cátions de cálcio (Ca), sódio (Na), magnésio (Mg), potássio (K), ferro (Fe), manganês (Mn), amónia (NH_4) e alumínio (Al). Os aniões de cloreto (Cl), nitrato (NO_3), fosfato (PO_4) e sulfato (SO_4) foram determinados de imediato, sobre as amostras filtradas.

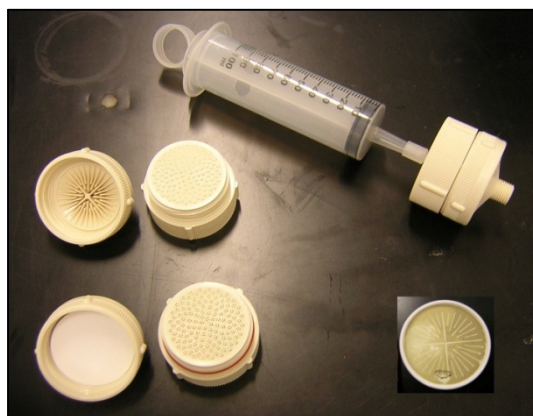


Figura 5.9 - Filtro e seringa usados para filtração das amostras em laboratório.

As técnicas usadas para medição dos aniões foram variadas, tendo-se utilizado a espectrofotometria de UV – visível para os nitratos e os fosfatos com o equipamento Spectronic 1201 da Milton Roy (Milton Roy Company, 1992); método turbidimétrico para os sulfatos recorrendo-se ao Turbidímetro Portátil da HANNA Instruments (HANNA Instruments, 1999) e titulação para os cloretos e os bicarbonatos, tendo-se neste último caso usado o titulador digital da Hach, como anteriormente referido.

No que diz respeito aos cátions de Ca, Na, Mg, K, Fe e Mn, estes foram medidos por espectrofotometria de absorção atômica através do equipamento da Perkin – Elmer 2380

Atomic Absorption Spectrophotometer (Perkin-Elmer Corporation, 1987), o Al por espectrofotometria de absorção atômica com grafite (GFAAS), recorrendo ao equipamento Solaar - AA Series Spectrometer Thermo Electron Corporation (Thermo Electron Corporation, 2003) e para a amónia usou-se o método colorimétrico proposto pela LaMotte Company - Ammonia nitrogen test kit: Octa-slide method (LaMotte Company, 1998). Exceção para o Fe e Mn, que na campanha de 2012 foram determinados no Solaar - AA Series Spectrometer Thermo Electron Corporation (Thermo Electron Corporation, 2003). Em 2013, todos os cátions foram analisados no equipamento Solaar - AA Series Spectrometer Thermo Electron Corporation (Thermo Electron Corporation, 2003), através de espectrofotometria de absorção atômica e de absorção atômica com grafite para o Al.

A Tabela 5.1 apresenta um resumo destes métodos e respetivos equipamentos usados para a determinação de cada um dos parâmetros.

Tabela 5.1 - Parâmetros físico-químicos analisados nas águas amostradas, unidades de medida, métodos e equipamentos usados.

		Método	Equipamento
Parâmetros Físico-químicos	pH	Eletrometria (elétrodo de vidro)	Sonda Multiparamétrica WQC24
	Condutividade elétrica específica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Método dos 4 elétrodos AC	
	Oxigénio dissolvido (mg/L)	Eletrometria (elétrodo de membrana galvânica)	
	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Termorresistência de platina	
	Salinidade (%)	Convertido através da condutividade	
	Turbidez (NTU)	Nefelométrico - espalhamento de luz a 90° (infravermelho)	
	Eh (mV)	Eletrometria (platina - prata/cloreto de prata)	Sonda WTW - modelo pH325 e Sonda Multiparamétrica Eijkelkamp
Parâmetros Químicos	Bicarbonato (mg/L)	Titulação com H_2SO_4	Titulador digital Hach
	Cloreto (mg/L)	Titulação com AgNO_3	Pipeta
	Nitrato (mg/L)	Espetrofotometria de UV - visível	Spectronic 1201 - Milton Roy
	Fosfato ($\mu\text{g}/\text{L}$)		
	Sulfato (mg/L)	Turbidimétrico	Turbidímetro Portátil - HANNA Instruments
	Cálcio (mg/L)	Espetrofotometria de absorção atômica	Perkin - Elmer 2380 Atomic Absorption Spectrophotometer e Solaar - AA Series Spectrometer Thermo Electron Corporation
	Sódio (mg/L)		
	Magnésio (mg/L)		
	Potássio (mg/L)		
	Ferro (mg/L)		
	Manganês (mg/L)		
	Alumínio (mg/L)	Espetrofotometria de absorção atômica com grafite (GFAAS)	Solaar - AA Series Spectrometer Thermo Electron Corporation
Amónia (mg/L)	Colorimétrico	Ammonia nitrogen test kit (Octa-slide method)- Model Pan LaMotte Company	

Na Tabela 5.2 apresenta-se o cronograma de medições *in situ* e de amostragens para análises químicas em cada um dos locais de estudo, com a quantificação do número de medições efetuadas por campanha.

Tabela 5.2 - Cronograma das tarefas executadas por campanha de campo.

		Tarefas executadas nos locais de estudo													
Atividade	Local	Fev-2007	Set-2007	Mai-2008	Out-2008	Mai-2009	Out-2009	Mai-2010	Jul-2010	Jun-2011	Jul-2011	Fev-2012	Mar-2012	Abr-2012	Jun-2013
		Parâmetros físico-químicos (pH, condutividade elétrica específica, oxigénio dissolvido, temperatura, salinidade, turbidez e Eh)	MhM	35 medidas	35 medidas	35 medidas	35 medidas	35 medidas	35 medidas	35 medidas	17 medidas	10 medidas	1 medida	10 medidas	
BhF										19 medidas		10 medidas	10 medidas		2 medidas
Amostragem para análise química (HCO ₃ , Cl, NO ₃ , SO ₄ , PO ₄ , Ca, Na, Mg, K, Fe, Mn, NH ₄ e Al)	MhM									10 medidas	1 medida	10 medidas		1 medida	2 medidas
	BhF									19 medidas		10 medidas	10 medidas		2 medidas

5.2 - Resultados dos parâmetros físico-químicos das águas

Em geral, podem distinguir-se dois tipos de erros nas análises químicas: erros de precisão ou estatísticos que refletem flutuações aleatórias no processo analítico, e erros de exatidão ou sistemáticos que evidenciam desvios sistemáticos devido a procedimentos com falhas ou interferências durante as análises. A repetição da análise da mesma amostra permite calcular a precisão e os erros sistemáticos são detetados por determinações em amostras de referência e através de comparações interlaboratoriais (Appelo & Postma, 2005).

No conjunto das amostras ensaiadas em laboratório selecionaram-se, de forma aleatória, cerca de 10 a 13 %, para repetição da análise na tentativa de aferir a precisão dos resultados. Relativamente às medições de campo com a sonda multi-paramétrica, a repetibilidade ocorreu em 100 % das amostras, dada a facilidade e rapidez de leitura deste equipamento; de referir que no caso do Eh repetiram-se as medições em, aproximadamente, 61 % das amostras e para a alcalinidade em, cerca de, 10 % (Tabela 5.3).

Comparando a dispersão dos valores por parâmetro físico-químico, verifica-se uma maior variação no potássio e no fosfato, no entanto, com resultados médios inferiores a 10 %. Todos os outros parâmetros têm erros muito pequenos, sempre inferiores a 5 %, o que revela uma boa precisão das determinações.

A título de exemplo (Tabela 5.4), apresenta-se a síntese dos erros de precisão obtidos para uma das amostras da campanha de 2012 (F15), podendo referir-se que no geral existe pouca dispersão dos valores entre medidas de cada parâmetro, sendo o fosfato o elemento que se destaca com um valor do coeficiente de variação de Pearson mais elevado.

Tabela 5.3 - Média dos erros de precisão por parâmetro para as amostras da campanha de 2012.

Parâmetro físico-químico	Média do parâmetro estatístico		Amostragem de repetição (%)
	Desvio padrão (σ)	Coefficiente de variação de Pearson (CV - %)	
T (°C)	0.003	0.031	100.0
pH	0.006	0.077	
SEC (μ S/cm)	0.194	0.037	
OD (mg/L)	0.032	0.456	
Turb (NTU)	0.098	2.371	
Sal (%)	0.000	0.000	
Eh (mV)	1.079	0.284	61.3
HCO ₃ (mg/L)	1.839	1.978	9.7
Cl (mg/L)	2.593	0.526	
NO ₃ (mg/L)	1.128	2.898	12.9
SO ₄ (mg/L)	0.610	1.418	
PO ₄ (μ g/L)	0.281	9.350	
Ca (mg/L)	1.139	1.721	
Na (mg/L)	4.087	3.045	
Mg (mg/L)	0.091	2.386	
K (mg/L)	1.291	7.847	

T - Temperatura; SEC - Condutividade elétrica específica; OD - Oxigénio dissolvido; Turb - Turbidez; Sal - Salinidade

Tabela 5.4 - Erros de precisão das medidas dos parâmetros físico-químicos da amostra F15.

Parâmetro físico-químico	Parâmetro estatístico				
	Valor Máximo (MAX)	Valor Mínimo (MIN)	Média (μ)	Desvio padrão (σ)	Coefficiente de variação de Pearson (CV - %)
T (°C)	11.50	11.50	11.50	0.00	0.00
pH	6.89	6.89	6.89	0.00	0.00
SEC (μ S/cm)	402.00	402.00	402.00	0.00	0.00
OD (mg/L)	9.55	9.53	9.54	0.01	0.10
Turb (NTU)	8.00	7.90	7.93	0.05	0.63
Sal (%)	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00
Eh (mV)	355.38	355.38	355.38	0.00	0.00
HCO ₃ (mg/L)	56.33	55.60	55.96	0.52	0.92
Cl (mg/L)	26.74	26.49	26.58	0.14	0.54
NO ₃ (mg/L)	68.73	65.70	67.64	1.69	2.49
SO ₄ (mg/L)	49.80	48.59	49.19	0.60	1.23
PO ₄ (μ g/L)	6.31	5.41	5.71	0.52	9.12
Ca (mg/L)	40.42	38.98	39.77	0.73	1.84
Na (mg/L)	18.66	18.20	18.36	0.26	1.42
Mg (mg/L)	7.14	7.06	7.11	0.04	0.59
K (mg/L)	14.45	13.62	14.01	0.42	2.97

T - Temperatura; SEC - Condutividade elétrica específica; OD - Oxigénio dissolvido; Turb - Turbidez; Sal - Salinidade

Em análises hidroquímicas completas, as concentrações totais de catiões e aniões (em meq/L) devem ser aproximadamente iguais. No entanto, erros inferiores a 10 % permitem considerar correta a análise química (Feitosa & Filho, 2000). A determinação do erro do balanço elétrico (BE) é efetuada através da equação [5.1], com as concentrações em meq/L (Clesceri *et al.*, 1998).

$$BE (\%) = \frac{\sum \text{Catiões} + \sum \text{Aniões}}{\sum \text{Catiões} - \sum \text{Aniões}} \times 100 \quad [5.1]$$

Considerando os catiões e aniões principais, a equação [5.1] transforma-se na equação [5.2], mantendo as unidades em meq/L (Appelo & Postma, 2005; Pina, 2009).

$$BE (\%) = \frac{\sum(Ca, Na, Mg, K) + \sum(HCO_3, Cl, NO_3, SO_4)}{\sum(Ca, Na, Mg, K) - \sum(HCO_3, Cl, NO_3, SO_4)} \times 100 \quad [5.2]$$

Outros autores, como Custodio & Llamas (1983), defendem a relação entre o erro admissível e a concentração total de sais solúveis em solução apresentando valores de referência para o erro de balanço iónico com base nos valores de condutividade elétrica (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 - Erros de balanço iónico admissíveis de acordo com a condutividade elétrica da água (Custodio & Llamas, 1983).

Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	50	200	500	2000	> 2000
Erro admissível (%)	30	10	8	4	4

Aplicando esta relação à totalidade das amostras, verifica-se que a grande maioria apresenta erros inferiores aos propostos por Custodio & Llamas (1983), e que apenas 3 % das amostras na campanha de 2011, e 16 % na campanha de 2012, apresentam erros superiores. A Figura 5.10 sintetiza estes resultados.

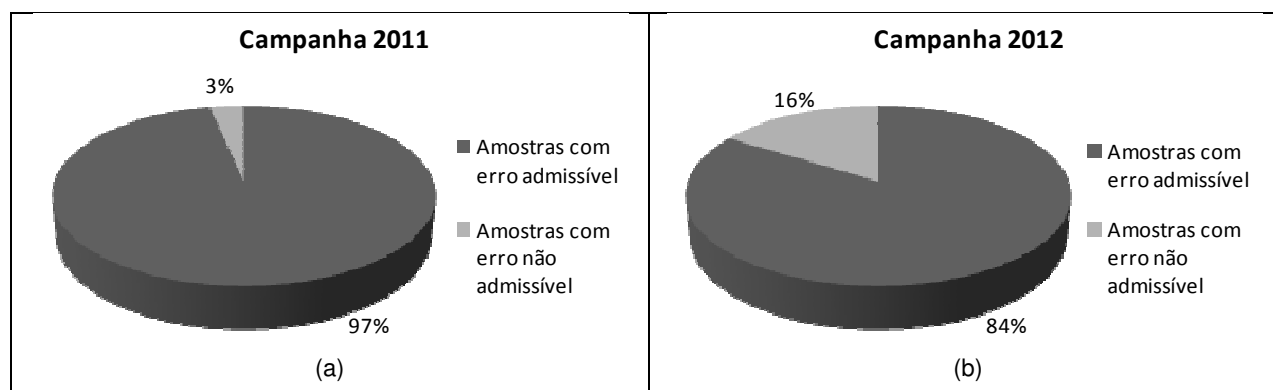


Figura 5.10 - Amostras das campanhas de 2011 (a) e 2012 (b) com erros de balanço iónico admissíveis de acordo com a condutividade elétrica da água.

A relação entre condutividade elétrica à temperatura de 25 °C (condutividade elétrica específica - SEC) permite uma boa estimativa dos valores das somas de catiões e aniões, traduzida pela equação [5.3].

$$\sum \text{aniões} = \sum \text{catiões} \text{ (meq/L)} \approx \text{SEC}/100 \text{ (}\mu\text{S/cm)} \quad [5.3]$$

Esta relação é apenas aplicável para os elementos maiores e válida para condutividades elétricas específicas até cerca de 1500 $\mu\text{S/cm}$ (Appelo & Postma, 2005). Clesceri *et al.* (1998) referem a aceitação de resultados para o intervalo $(0.9 - 1.1) * \text{SEC}/100$. Para as amostras em estudo constata-se que, no que diz respeito ao somatório dos valores dos catiões, ocorre boa correspondência, situando-se na maioria das amostras (cerca de 66 %) dentro do intervalo proposto por Clesceri *et al.* (1998), sendo estes resultados menos favoráveis no caso dos aniões, com apenas 40 % (percentagens médias para os dois anos de campanha).

Efetuuou-se ainda o cálculo da condição de eletroneutralidade usando a equação [5.2], de modo a controlar a qualidade dos resultados apresentados, aceitando-se balanços elétricos com erros de fecho inferiores a 10 %. Todas as amostras cumprem esta condição (Figura 5.11), sendo que 83 % das amostras na campanha de 2011 e 55 % na campanha de 2012 apresentam erros menores que 5 % (Appelo & Postma, 2005).

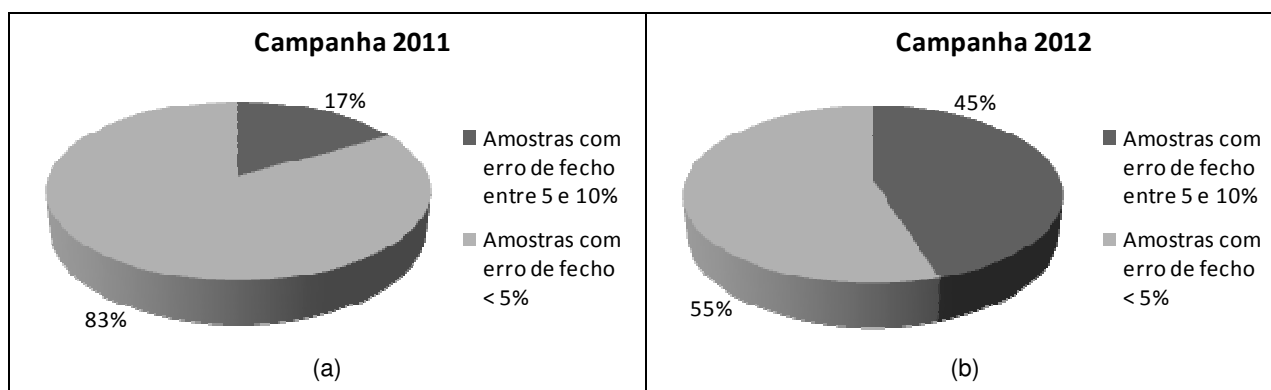


Figura 5.11 - Erros de fecho do balanço elétrico das amostras nas campanhas de 2011 (a) e 2012 (b).

Apresentam-se, igualmente, gráficos comparativos dos valores de condutividade elétrica específica com os erros de fecho do balanço elétrico (Figura 5.12 a Figura 5.15) verificando-se que, apesar de todas as amostras terem erros inferiores a 10 %, nem sempre os maiores erros foram obtidos para amostras com condutividade elétrica específica mais baixa, como defendido por Custodio & Llamas (1983); no entanto, isto é algo que se constata noutros estudos (Pina, 2009). Na campanha de 2012, as amostras em que ocorreram erros acima de 9 % foram M00, M01, M14 e F09; por outro lado as amostras M12 e M08 evidenciam erros da mesma ordem de grandeza, para uma condutividade elétrica específica baixa, de 213 $\mu\text{S/cm}$ e 259 $\mu\text{S/cm}$, respetivamente.

Na maioria dos resultados foi perceptível um balanço elétrico positivo evidenciando uma deteção por defeito dos aniões ou a presença de algum elemento não quantificado, mas que não comprometeu a utilização destes resultados.

A análise destas figuras (Figura 5.12 a Figura 5.15) também permite confirmar a boa correlação entre a condutividade elétrica específica e a quantidade de iões presentes nas águas, quanto maior a mineralização maior SEC.

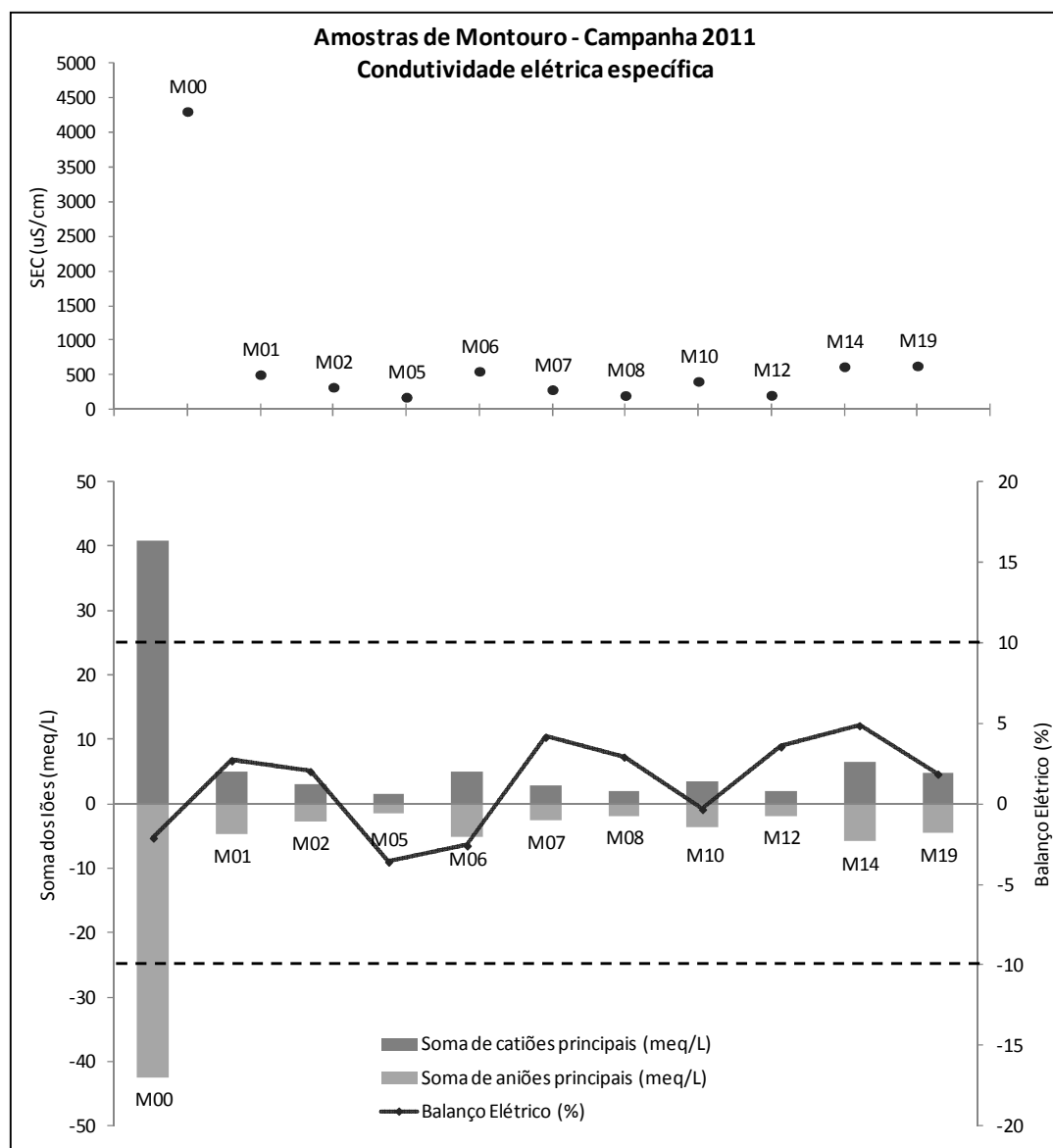


Figura 5.12 - Comparação entre o erro de fecho do balanço elétrico e a condutividade elétrica específica das amostras da MhM, na campanha de 2011.

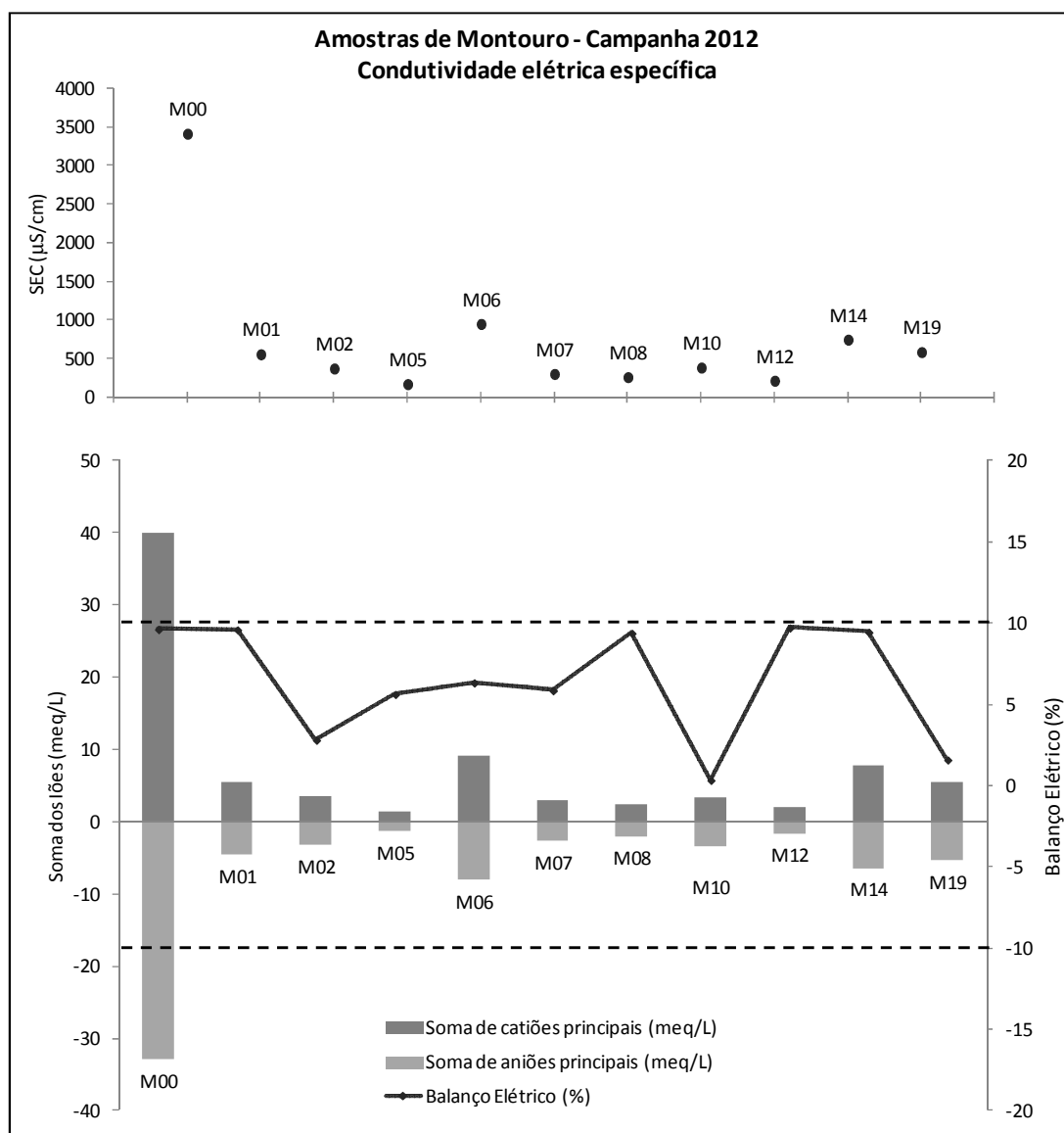


Figura 5.13 - Comparação entre o erro de fecho do balanço elétrico e a condutividade elétrica específica das amostras da MhM, na campanha de 2012.

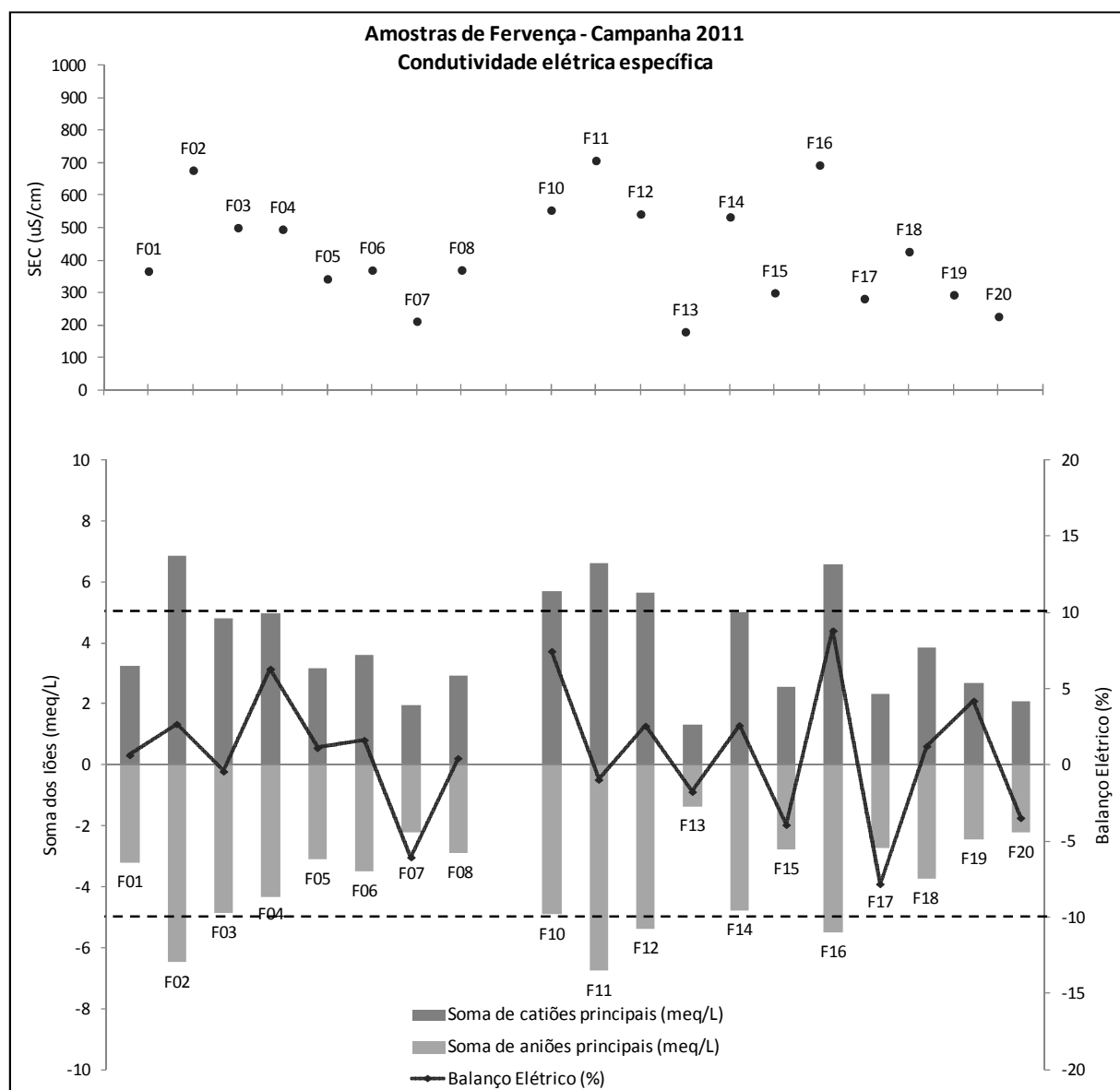


Figura 5.14 - Comparação entre o erro de fecho do balanço elétrico e a condutividade elétrica específica das amostras da BhF, na campanha de 2011.

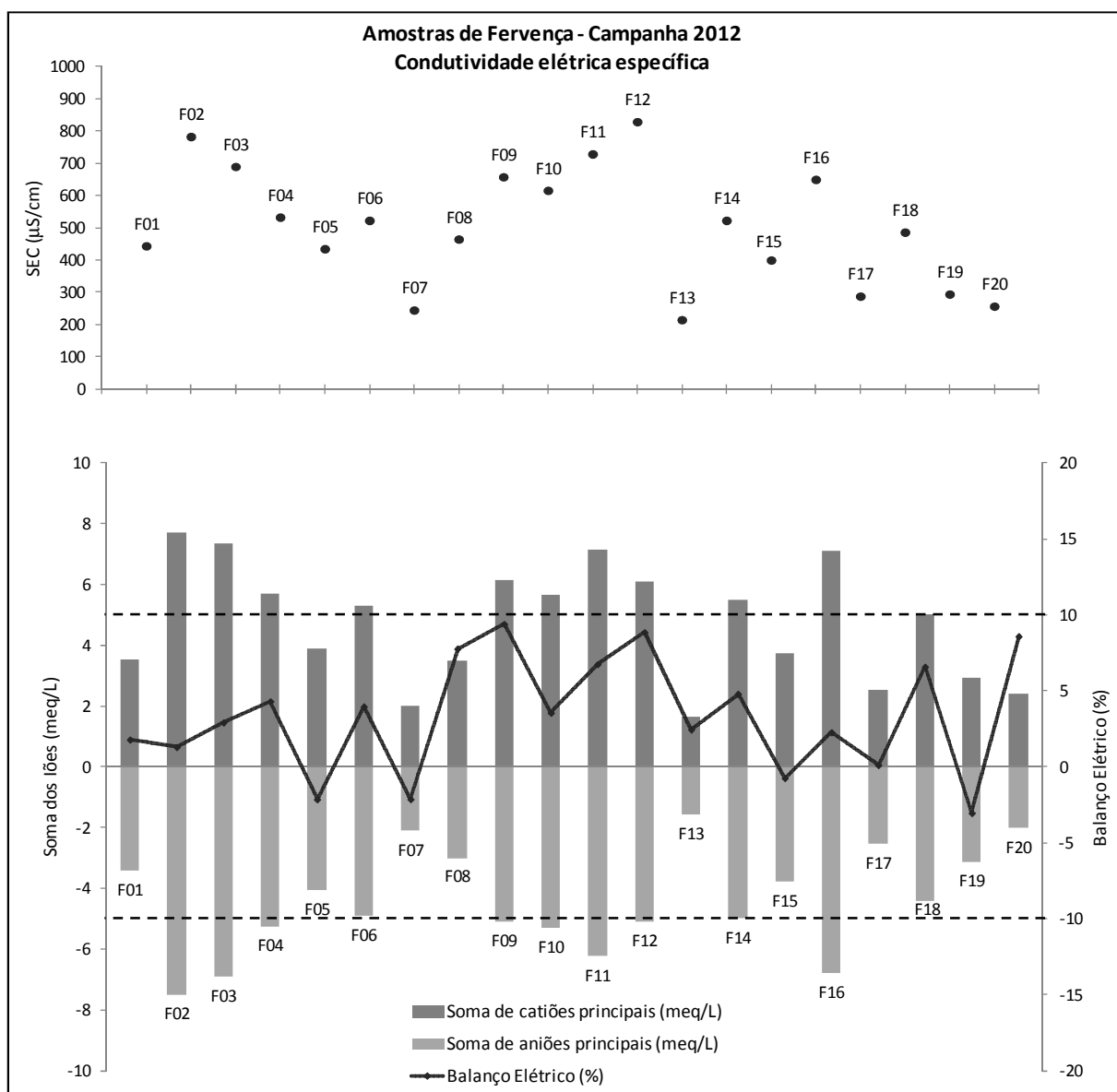


Figura 5.15 - Comparação entre o erro de fecho do balanço elétrico e a condutividade elétrica específica das amostras da BhF, na campanha de 2012.

Os resultados de todos os parâmetros físico-químicos medidos nas várias campanhas foram organizados e analisados através de tratamento estatístico, de modo a identificar tendências e padrões de comportamento dos dados, para melhor conhecer o quimismo das águas. Calcularam-se parâmetros como a média (μ), os valores máximo (MAX) e mínimo (MIN), a moda (M_0), a mediana (P_{50}), o desvio padrão (σ) e os percentis 10 (P_{10}) e 90 (P_{90}), para o conjunto de medições nas respetivas áreas de estudo. De seguida apresenta-se a análise estatística desenvolvida. Elaboraram-se mapas representativos da distribuição espacial de cada elemento físico-químico, de modo a identificar a existência de locais onde os processos hidrogeoquímicos são mais atuantes.

O processamento destes dados foi realizado com o auxílio de *software* como Microsoft Office Excel (Microsoft Corporation, 2007), SPSS (IBM, 2013), Rockworks (RockWare Inc., 2008), ArcGIS (ESRI Inc., 2010) e PhreeqC (Parkhurst & Appelo, 1999).

5.2.1 - Resultados das medidas em Montouro de 2007 a 2010

A nascente de Montouro vem sendo acompanhada desde fevereiro de 2007, através de duas campanhas anuais de medição de parâmetros físico-químicos, como já referido em 5.1, num total de 34 poços para além da própria nascente. Entre campanhas verificou-se que alguns dos poços foram sendo desativados e outros evidenciavam más condições de limpeza, por isso os resultados apresentados são apenas os de poços medidos no maior número de campanhas.

Na Tabela 5.6 é apresentado um resumo dos parâmetros estatísticos para as medições no poço da nascente (sem execução de bombagem) entre fevereiro de 2007 e julho de 2010 e na Tabela 5.7 para os poços na sua envolvente. Os resultados de julho de 2010 referem-se ao conjunto de 14 poços na área da MhM (Tabela 5.8).

Tabela 5.6 - Dados estatísticos dos parâmetros físico-químicos da nascente de Montouro entre fevereiro de 2007 e julho de 2010.

Parâmetro estatístico	Parâmetros físico-químicos						
	pH	OD (mg/L)	SEC (μ S/cm)	Turb (NTU)	T ($^{\circ}$ C)	Sal (%)	Eh (mV)
Média (μ)	7.43	6.10	2712.8	11.49	15.0	1.34	444.0
Valor Máximo (MAX)	7.93	14.57	4950.0	35.55	17.7	2.60	545.7
Valor Mínimo (MIN)	6.84	0.49	801.3	4.20	8.5	0.30	384.8
Moda (M_o)	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Mediana (P_{50})	7.43	6.93	2106.3	6.88	15.4	1.01	430.4
Desvio padrão (σ)	0.32	4.61	1694.3	10.41	3.0	0.93	57.9
Percentil P_{10}	7.15	1.60	904.3	4.48	12.3	0.37	386.8
Percentil P_{90}	7.72	10.37	4775.0	20.75	17.6	2.46	511.0
Nº de medidas	8	7	8	8	8	8	7

OD - Oxigénio dissolvido; SEC - Condutividade elétrica específica; Turb - Turbidez; T - Temperatura; Sal - Salinidade
#N/D - não determinável

Tabela 5.7 - Dados estatísticos dos parâmetros físico-químicos dos poços amostrados na envolvente de M00 entre fevereiro de 2007 e maio de 2010.

Parâmetro estatístico	Parâmetros físico-químicos						
	pH	OD (mg/L)	SEC (μ S/cm)	Turb (NTU)	T ($^{\circ}$ C)	Sal (%)	Eh (mV)
Média (μ)	7.61	8.97	427.4	11.24	17.1	0.16	389.2
Valor Máximo (MAX)	10.28	71.20	1020.0	208.33	22.6	0.50	592.3
Valor Mínimo (MIN)	5.13	0.68	154.0	0.90	9.3	0.00	-52.2
Moda (M_o)	7.92	6.51	314.0	5.40	16.6	0.10	379.3
Mediana (P_{50})	7.55	9.08	400.1	6.01	17.2	0.10	402.8
Desvio padrão (σ)	0.77	5.81	178.6	21.39	3.0	0.09	100.7
Percentil P_{10}	6.79	3.50	229.0	2.63	12.2	0.10	302.5
Percentil P_{90}	8.73	13.28	663.0	22.52	20.9	0.30	488.3
Nº de medidas	232	199	232	232	232	232	198

OD - Oxigénio dissolvido; SEC - Condutividade elétrica específica; Turb - Turbidez; T - Temperatura; Sal - Salinidade

Tabela 5.8 - Dados estatísticos dos parâmetros físico-químicos dos poços amostrados na microbacia hidrográfica de Montouro em julho de 2010.

Parâmetro estatístico	Parâmetros físico-químicos						
	pH	OD (mg/L)	SEC (μ S/cm)	Turb (NTU)	T ($^{\circ}$ C)	Sal (%)	Eh (mV)
Média (μ)	7.02	4.29	460.3	12.81	19.0	0.16	455.1
Valor Máximo (MAX)	7.72	9.83	898.8	64.40	23.8	0.40	536.8
Valor Mínimo (MIN)	6.54	0.32	194.5	2.90	14.6	0.00	132.9
Moda (M_0)	#N/D	#N/D	#N/D	4.50	#N/D	0.10	#N/D
Mediana (P_{50})	6.92	3.91	372.4	7.68	18.8	0.10	486.9
Desvio padrão (σ)	0.39	3.43	236.7	15.77	2.6	0.12	100.2
Percentil P_{10}	6.59	0.50	211.4	3.81	16.5	0.03	404.9
Percentil P_{90}	7.61	9.19	808.4	19.24	22.2	0.30	524.2
N $^{\circ}$ de medidas	14	14	14	14	14	14	14

OD - Oxigénio dissolvido; SEC - Condutividade elétrica específica; Turb - Turbidez; T - Temperatura; Sal - Salinidade
#N/D - não determinável

Apresenta-se um conjunto de gráficos ilustrativos dos valores de pH, SEC, salinidade (Figura 5.16 a Figura 5.18) medidos nos poços envolventes à nascente durante o período de 2007 a 2010 e na Figura 5.19 nos poços na microbacia hidrográfica em julho de 2010, constituindo uma referência na comparação quantitativa dos resultados obtidos no mesmo período para a nascente (Figura 5.20).

Da análise destes elementos é de salientar a estabilidade do pH entre campanhas, verificando-se a correspondência direta entre a salinidade e a condutividade elétrica específica, cujos máximos são alcançados em simultâneo e nas campanhas de verão. Exceção para outubro de 2009 em que a nascente não segue esta tendência, facto este provavelmente associado às baixas precipitações nos meses precedentes refletidas num dos mais baixos níveis piezométricos de que dispomos medidas.

Destaca-se os valores de condutividade elétrica específica da nascente significativamente elevados, com uma média de 2713 μ S/cm, face aos dos restantes pontos de amostragem, com média de 427 a 460 μ S/cm. A salinidade da água da nascente tem igualmente valores muito díspares comparativamente aos das outras águas da área estudada, mas concordantes com os valores de SEC medidos. A temperatura, apesar de um pouco variável ao longo do ano, tem valores médios abaixo dos restantes registados, denotando menor influência da temperatura do ar.

Numa primeira análise podemos referir que as propriedades da água da nascente de Montouro e o seu comportamento distinto relativamente às restantes águas indicam estarmos na presença de águas com origens diferentes.

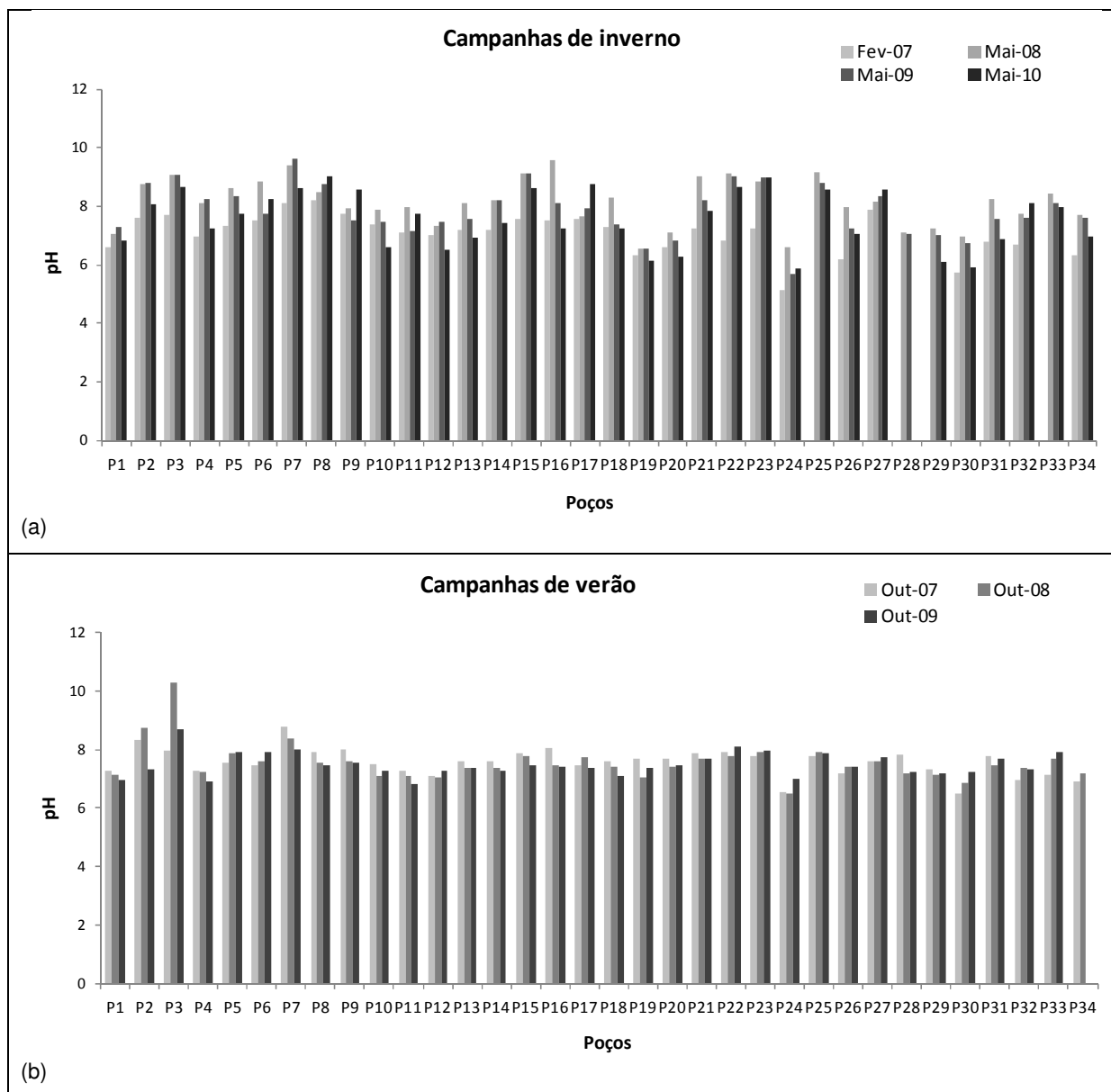


Figura 5.16 - Valores de pH dos poços na envolvente de M00 nas campanhas de inverno (a) e verão (b) entre fevereiro de 2007 e maio de 2010.

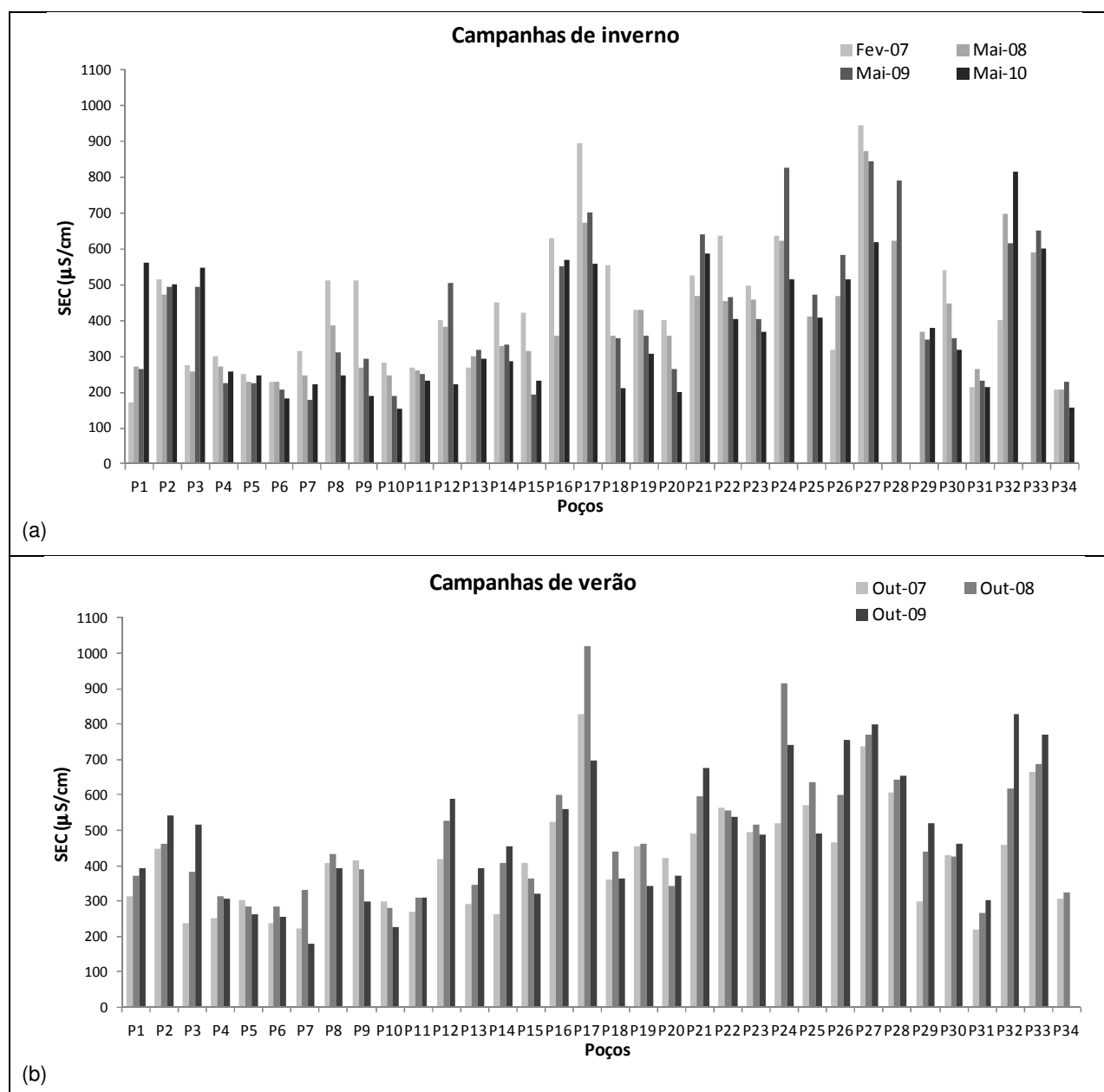


Figura 5.17 - Valores de SEC dos poços na envolvente de M00 nas campanhas de inverno (a) e verão (b) entre fevereiro de 2007 e maio de 2010.

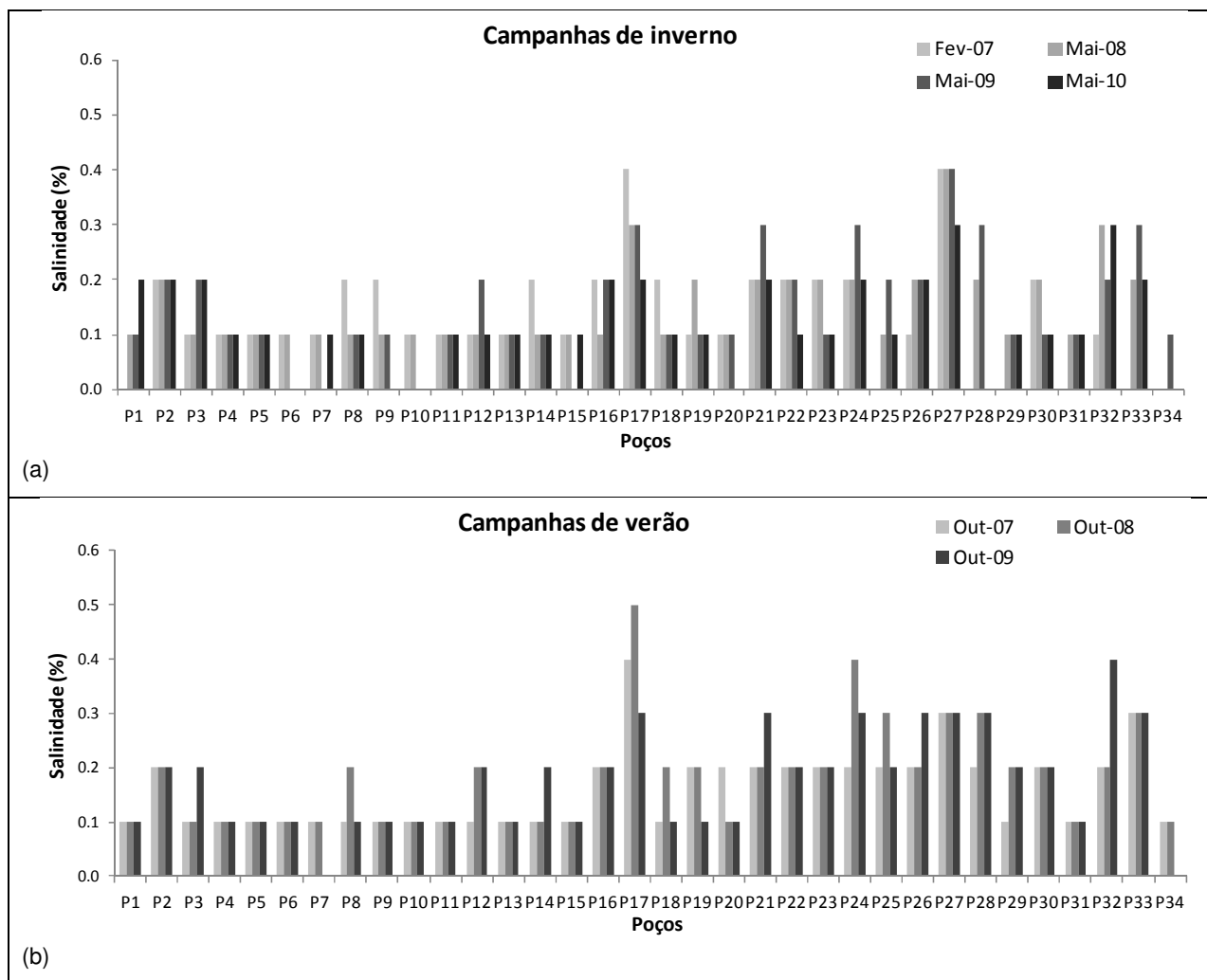


Figura 5.18 - Valores de salinidade dos poços na envolvente de M00 nas campanhas de inverno (a) e verão (b) entre fevereiro de 2007 e maio de 2010.

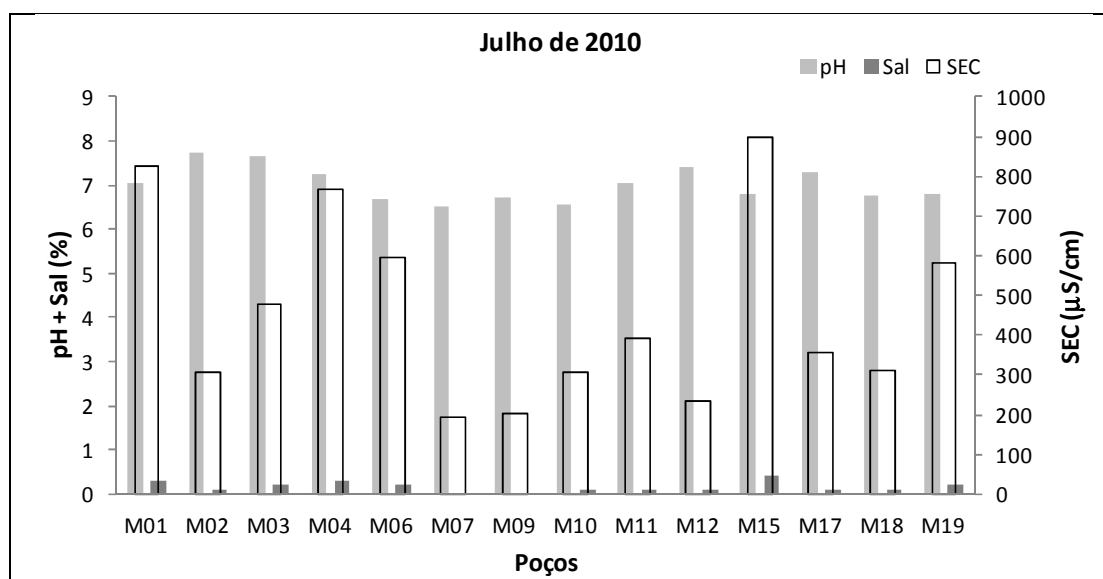


Figura 5.19 - Valores de pH, salinidade e SEC dos poços na MhM em julho de 2010.

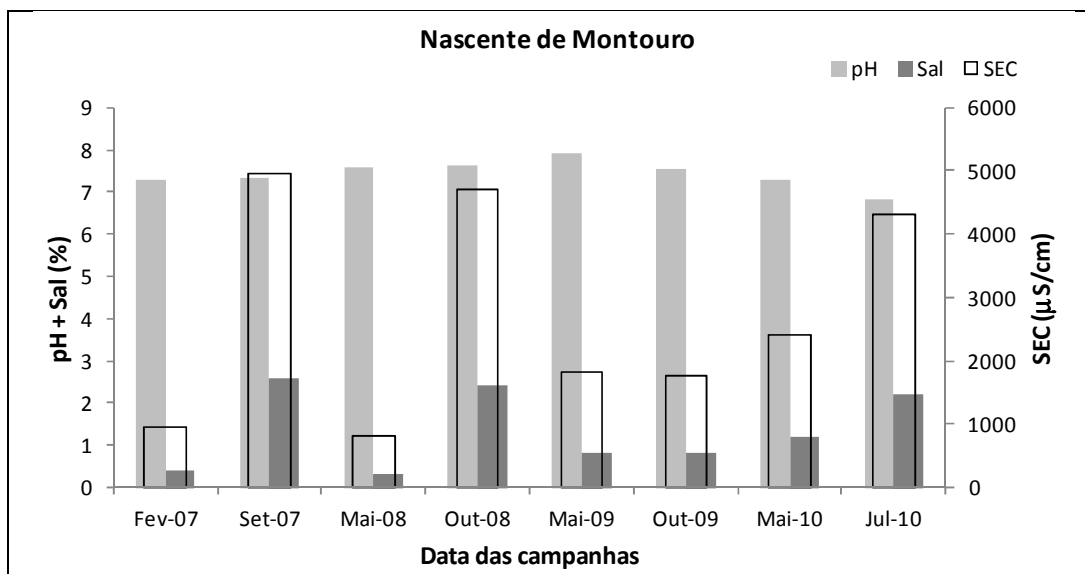


Figura 5.20 - Valores de pH, salinidade e SEC da nascente de Montouro entre fevereiro de 2007 e julho de 2010. É possível observar a relação direta entre salinidade e SEC.

5.2.2 - Resultados das campanhas de 2011 e 2012

Nas campanhas de 2011 (verão) e de 2012 (inverno), na microbacia hidrográfica de Montouro foram amostrados dez poços para além da própria nascente, num total de onze determinações. Os dados estatísticos apresentados para os pontos amostrados excluem os valores obtidos para a nascente de Montouro, que são referidos separadamente. Na bacia hidrográfica de Ferveça foi considerado um total de vinte pontos de água para amostragem, mas na campanha de verão um dos poços (F09) estava seco, devido ao abaixamento do nível piezométrico, impossibilitando a recolha de água.

Os resultados das determinações de catiões e aniões são expressos em mg/L, de acordo com o Sistema Internacional de unidades (S.I.); no entanto, para concentrações inferiores a 0.1 mg/L os resultados são apresentados em µg/L (Clesceri *et al.*, 1998).

5.2.2.1 - Temperatura

A variação da temperatura das águas subterrâneas em geral é pequena (Custodio & Llamas, 1983; Hem, 1985), na ordem de 1 a 2 °C (Feitosa & Filho, 2000), e independente da temperatura atmosférica, com exceção para os aquíferos pouco profundos cuja temperatura da água é igual ou ligeiramente superior à média anual da temperatura atmosférica registada no local (Custodio & Llamas, 1983). A temperatura afeta a viscosidade da água e a capacidade de absorção de gases (Custodio & Llamas, 1983), assim como a solubilidade e, portanto, a mobilização de elementos químicos (Siegel, 2002). Temperaturas mais elevadas promovem um aumento das substâncias dissolvidas e conseqüentemente condutividade específica mais elevada (Carvalho, 2004).

A Tabela 5.9 apresenta o resumo dos parâmetros estatísticos da temperatura referentes às campanhas de 2011 e 2012 nas respetivas áreas de estudo e a Figura 5.21 e a Figura 5.22 a representação espacial da temperatura da água registada em cada ponto de amostragem.

Tabela 5.9 - Dados estatísticos dos valores de temperatura da água (°C) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferveça	Montouro	Ferveça
Média (μ)	19.0	19.8	8.3	10.9
Valor Máximo (MAX)	20.0	22.9	10.0	12.8
Valor Mínimo (MIN)	17.9	17.2	5.8	9.4
Moda (M_o)	#N/D	19.3	8.6	11.0
Mediana (P_{50})	19.0	19.3	8.4	11.0
Desvio padrão (σ)	0.8	1.7	1.2	0.9
Percentil P_{10}	18.0	18.0	7.3	9.9
Percentil P_{90}	19.8	22.4	9.6	12.1
Nº de medidas	10	19	10	20

#N/D - não determinável

As temperaturas da água na campanha de 2011 são superiores às da campanha de 2012, uma vez que em 2011 a amostragem foi realizada nos meses de junho e julho enquanto em 2012 a campanha decorreu em meses de inverno (Tabela 5.2). As temperaturas da água são da mesma ordem de grandeza entre as zonas de estudo, variando entre campanhas de cerca de 8 °C a 19 °C em Montouro e com uma amplitude de aproximadamente 9 °C em Ferveça (valores médios).

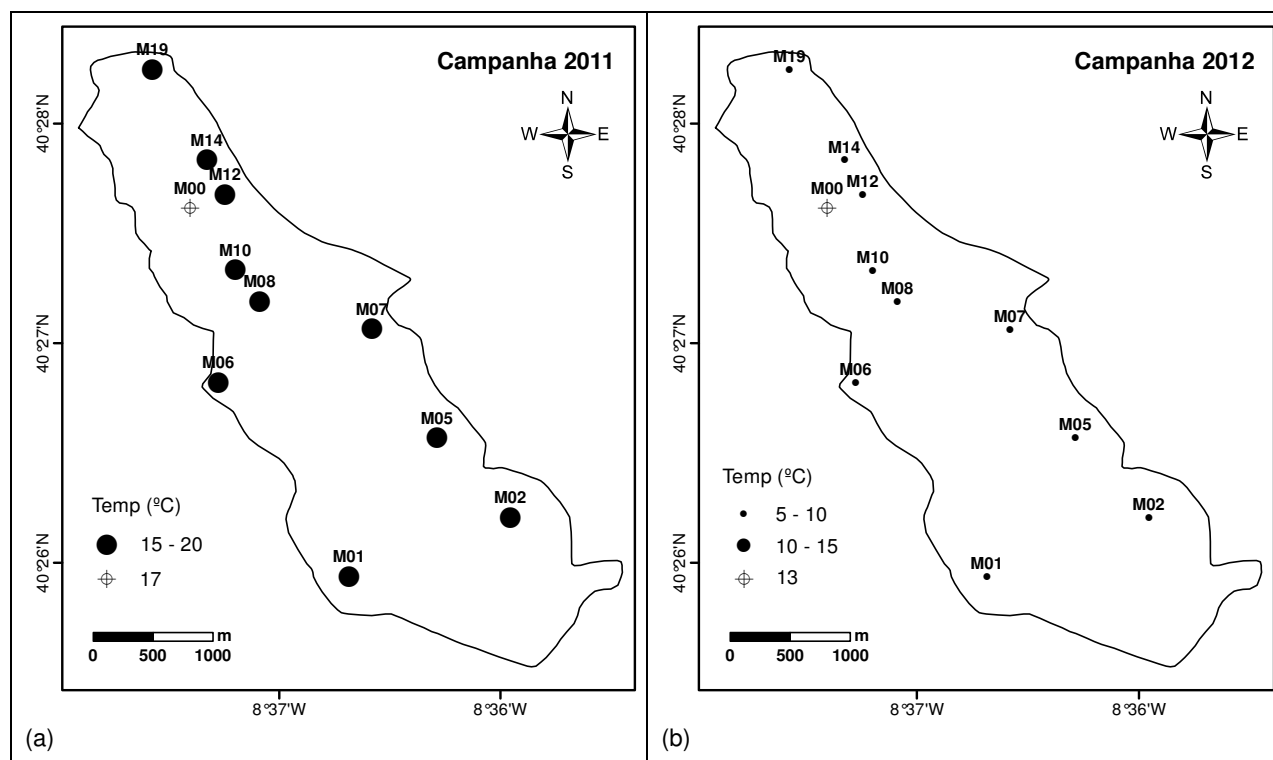


Figura 5.21 - Distribuição espacial da temperatura da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

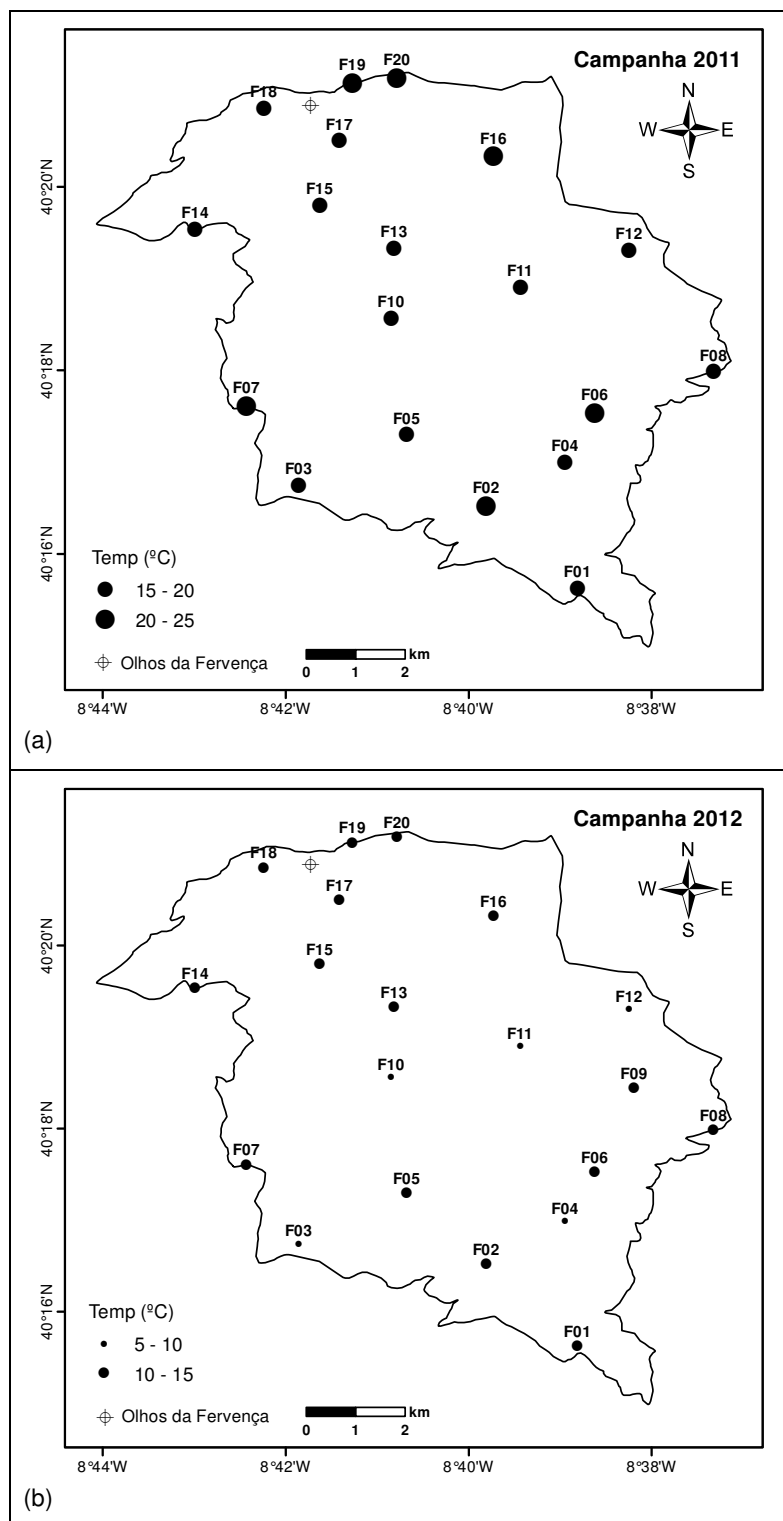


Figura 5.22 - Distribuição espacial da temperatura da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

Pulido Carrillo (1978) refere que águas com temperatura inferior a 16 °C são águas frias, de 16 a 22 °C são águas normais e superiores a 22 °C classificam-se como águas quentes. Considerando estes intervalos podemos indicar que todas as águas da campanha de 2012 são designadas como águas frias enquanto na campanha de 2011 em Montouro as águas são normais e em Ferverença temos águas normais e quentes, estas últimas provavelmente com

relação à menor profundidade do ponto de água (F19) e a possível aquecimento resultante das temperaturas elevadas na altura da amostragem.

A nascente de Montouro (M00) é uma água fria a normal, comprovada pelas temperaturas de 13 a 17 °C nas campanhas em análise (Figura 5.21).

5.2.2.2 - pH

O pH representa a medida da concentração hidrogeniónica da água ($\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$), estando dependente de reações químicas e do equilíbrio químico entre iões. O percurso da água através das rochas, a presença de CO_2 atmosférico ou de outros gases dissolvidos são responsáveis pelos respetivos valores de pH. A maioria das águas subterrâneas tem pH entre 6.5 e 8.0 e mais raramente entre 5.5 e 8.5, existindo casos excecionais com valores entre 3 e 11 (Custodio & Llamas, 1983). A presença de bicarbonatos e carbonatos contribui para um pH maior.

Os valores medidos em cada uma das colheitas estão presentes na Figura 5.23 e na Figura 5.24, tendo sido submetidos a tratamento estatístico apresentado na Tabela 5.10.

A nascente de Montouro com pH de 7.4 e 7.3, em 2011 e 2012 respetivamente, demonstra valores relativamente constantes.

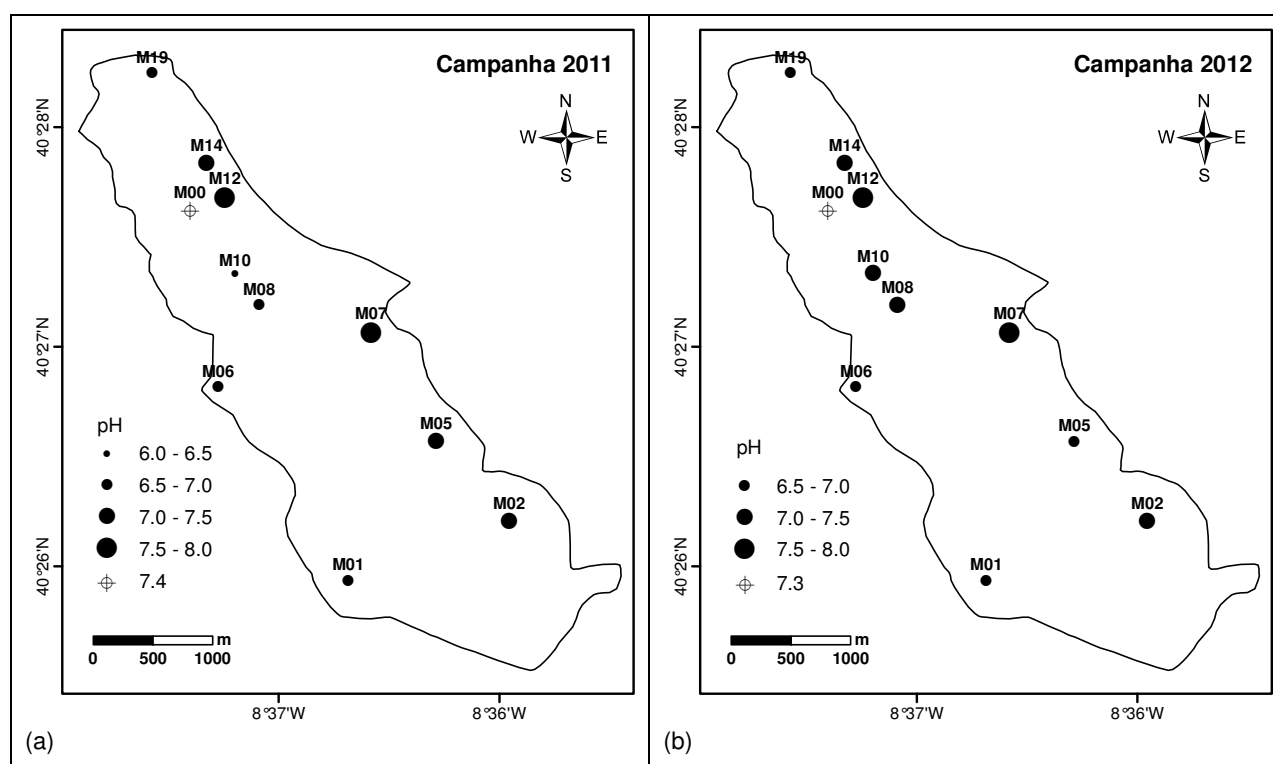


Figura 5.23 - Distribuição espacial do pH da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

A maioria dos pontos amostrados tem pH dentro dos valores normais para as águas subterrâneas (6.5 a 8.0), no entanto na campanha de 2011 F02, F06 e F08 com registos de pH

de 8.5, 8.2 e 8.4, respetivamente, superam o máximo do intervalo referido mas estão dentro dos valores admissíveis (≤ 8.5) e F15 e M10 respetivamente com 6.4 e 6.2 que estão abaixo do mínimo mas incluídas no intervalo mais alargado para as águas subterrâneas (≥ 5.5).

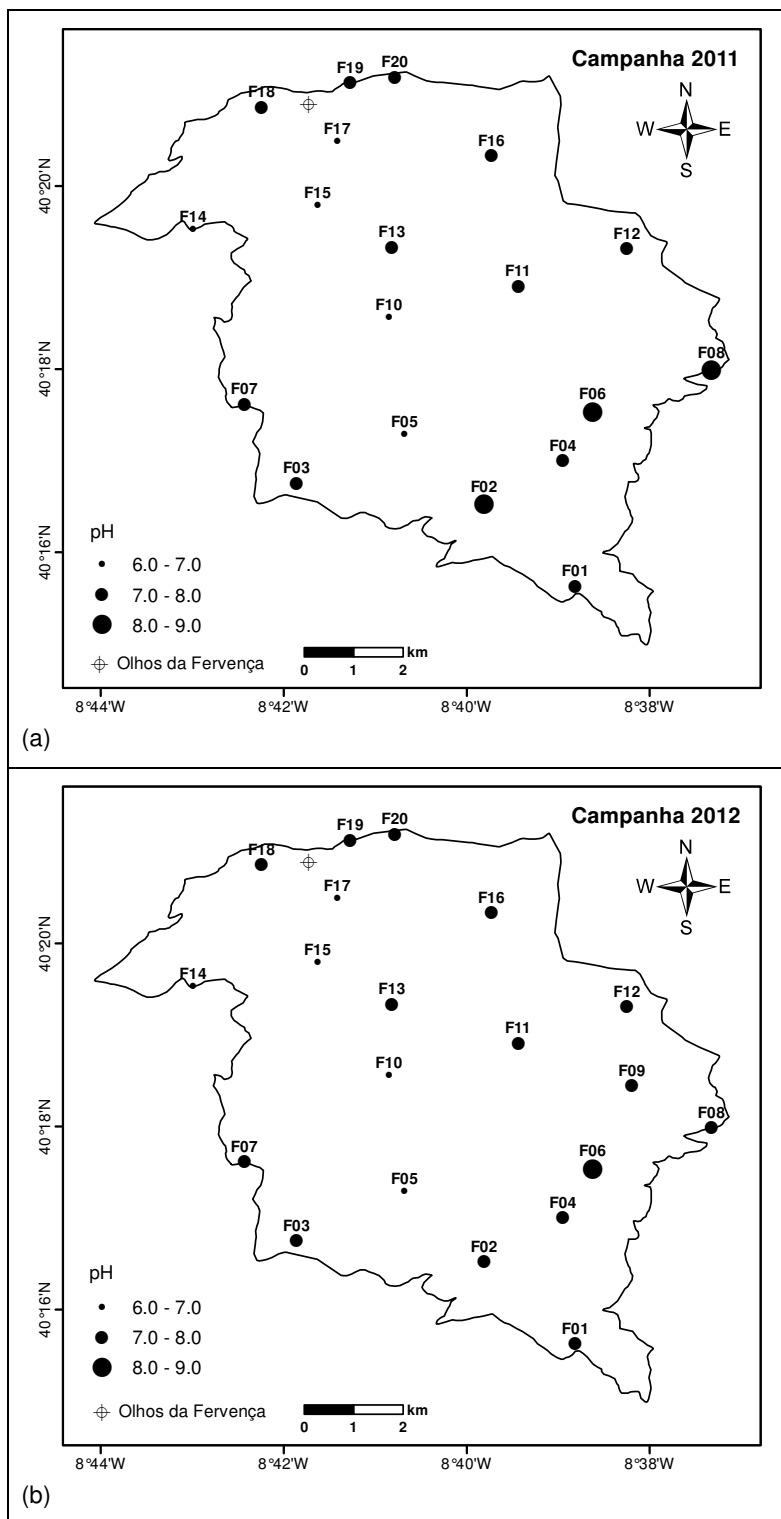


Figura 5.24 - Distribuição espacial do pH da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

Tabela 5.10 - Dados estatísticos dos valores de pH dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferveça	Montouro	Ferveça
Média (μ)	7.05	7.45	7.17	7.36
Valor Máximo (MAX)	7.71	8.52	7.74	8.01
Valor Mínimo (MIN)	6.18	6.44	6.76	6.60
Moda (M_o)	#N/D	#N/D	#N/D	7.70
Mediana (P_{50})	7.02	7.38	7.20	7.30
Desvio padrão (σ)	0.45	0.57	0.33	0.42
Percentil P_{10}	6.66	6.88	6.82	6.86
Percentil P_{90}	7.68	8.26	7.57	7.79
Nº de medidas	10	19	10	20

#N/D - não determinável

Na campanha de 2012, que decorreu em meses de inverno, as águas deveriam ter menores valores de pH comparativamente aos dos meses de verão, uma vez que uma água mais fria dissolve mais CO_2 logo será mais ácida que uma água mais quente (Siegel, 2002). Em 10 amostras, 5 em Montouro (M01, M02, M06, M08 e M10) e 5 em Ferveça (F03, F07, F11, F13 e F15) isto não se verificou, no entanto, em algumas as diferenças de valores de temperatura são pouco significativas (0.1 °C).

5.2.2.3 - Condutividade elétrica específica

A condutividade elétrica corresponde à capacidade da água em conduzir corrente elétrica, estando diretamente relacionada com a quantidade e tipo de iões dissolvidos. Este parâmetro aumenta com a temperatura, cerca de 2 % a cada °C (Custodio & Llamas, 1983), tornando-se conveniente apresentar os seus valores para uma temperatura de referência. Neste caso adotou-se a indicação da condutividade elétrica específica (SEC) para a temperatura de 25 °C.

Condutividades elétricas mais elevadas nas águas subterrâneas podem estar associadas a processos naturais, como as dissoluções decorrentes da interação água-rocha, ou processos de contaminação, nomeadamente de origem doméstica, agrícola, industrial ou intrusões salinas.

Os resultados estatísticos obtidos para a condutividade elétrica específica estão sintetizados na Tabela 5.11 e a distribuição espacial deste parâmetro está contida nos mapas da Figura 5.25 e da Figura 5.26.

O valor de SEC da nascente de Montouro (4310 e 3410 $\mu S/cm$, nas campanhas de 2011 e 2012, respetivamente) é consideravelmente distinto do das restantes águas na mesma região que têm máximos de 642 e 948 $\mu S/cm$, respetivamente nas campanhas de 2011 e 2012. Este comportamento tem-se mantido constante desde que a nascente vem sendo acompanhada.

Na bacia hidrográfica de Ferveça os máximos são de 709 $\mu S/cm$ na campanha de 2011 e 831 $\mu S/cm$ na campanha de 2012.

Entre as duas amostragens com temperaturas da água bastante diferentes, constata-se que nem sempre se verifica um maior valor de SEC para maior temperatura da água, como referido em 5.2.2.1. Na BhF a maioria das amostras tem uma variação inversa (16 em 20) e na MhM isto aconteceu em metade dos pontos de água. Este aspeto poderá estar relacionado com o inverno atípico de 2012 em que a precipitação de outubro de 2011 a fevereiro/março de 2012 foi muito inferior aos valores médios normais (IM, 2012a; 2012d; 2012e; 2012i).

Tabela 5.11 - Dados estatísticos dos valores de SEC ($\mu\text{S/cm}$) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferverça	Montouro	Ferverça
Média (μ)	402.2	426.4	452.5	505.2
Valor Máximo (MAX)	641.5	709.0	948.0	831.0
Valor Mínimo (MIN)	190.0	181.0	169.0	217.0
Moda (M_o)	#N/D	#N/D	#N/D	525.0
Mediana (P_{50})	375.9	371.5	376.0	506.8
Desvio padrão (σ)	175.8	163.9	251.4	185.1
Percentil P_{10}	211.8	225.1	208.6	257.8
Percentil P_{90}	631.2	682.2	765.3	736.4
Nº de medidas	10	19	10	20

#N/D - não determinável

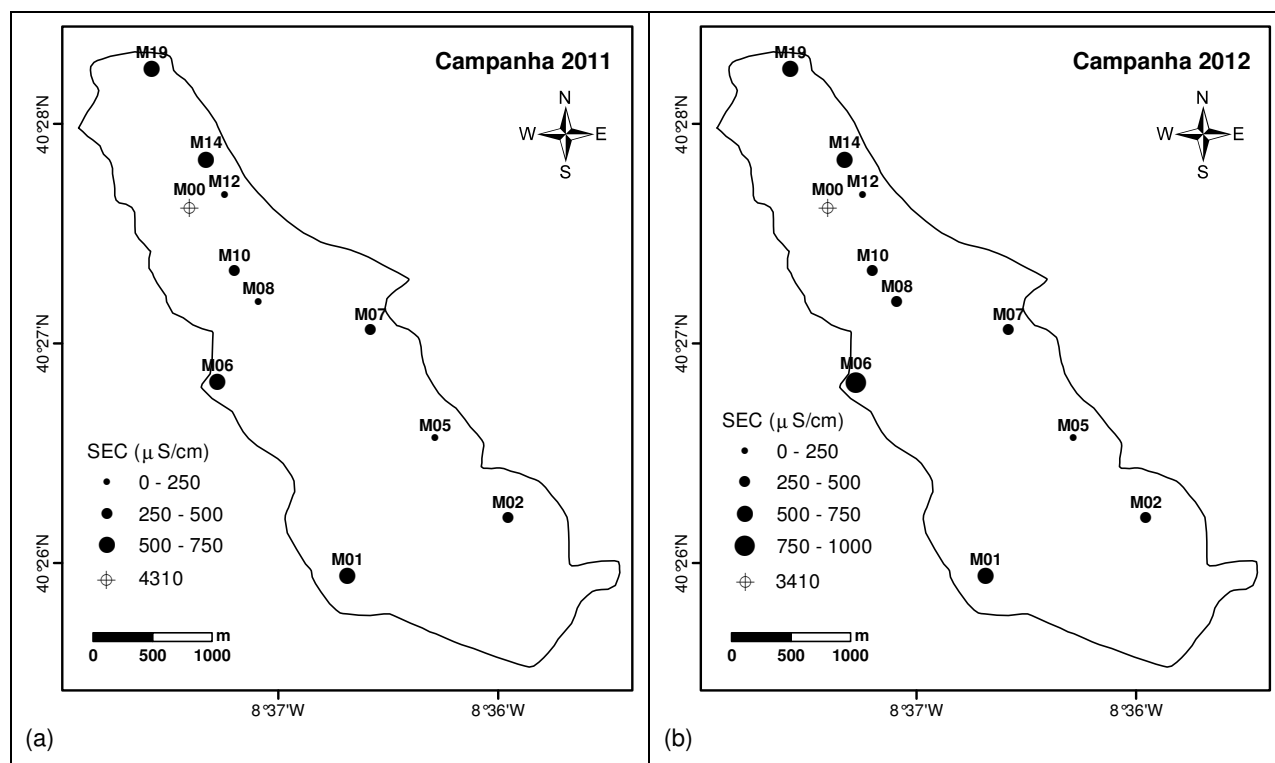


Figura 5.25 - Distribuição espacial de SEC da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

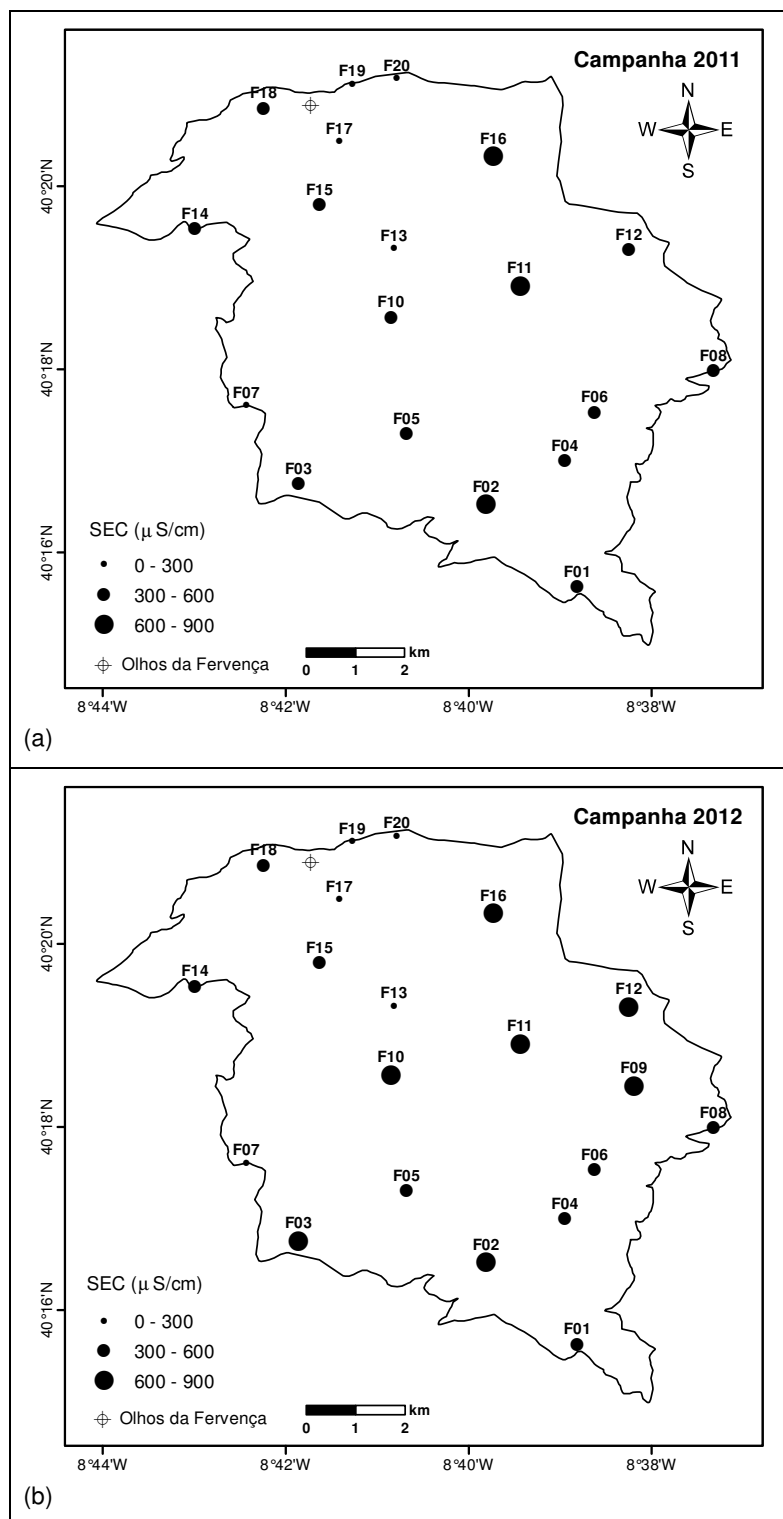


Figura 5.26 - Distribuição espacial de SEC da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

5.2.2.4 - Salinidade

A determinação desta propriedade é feita de forma indireta, através da medição da condutividade elétrica, e traduz a medida de sais dissolvidos na água. Existe uma relação direta entre este parâmetro e a condutividade elétrica, em que a condutividade elétrica cresce com o conteúdo de sais dissolvidos (Custodio & Llamas, 1983).

Na Tabela 5.12 indicam-se os dados estatísticos para a salinidade, com máximos de 0.30 % na BhF em ambas as campanhas, e 0.30 e 0.40 % na MhM em 2011 e 2012, respetivamente. Relativamente à salinidade da nascente de Montouro (2.20 % em 2011 e 1.70 % em 2012) os valores dos restantes pontos amostrados são muito inferiores e individualmente estão em concordância com as medidas da condutividade elétrica específica, aumentando a salinidade quando SEC aumenta (Figura 5.27 e Figura 5.25). O mesmo ocorre na BhF, em que as medições da salinidade são semelhantes entre campanhas, exceto quando existem variações de SEC, o que é visível por comparação da Figura 5.28 com a Figura 5.26.

Tabela 5.12 - Dados estatísticos dos valores de salinidade (%) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferverça	Montouro	Ferverça
Média (μ)	0.16	0.16	0.15	0.20
Valor Máximo (MAX)	0.30	0.30	0.40	0.30
Valor Mínimo (MIN)	0.00	0.00	0.00	0.00
Moda (M_o)	0.10	0.10	0.10	0.20
Mediana (P_{50})	0.15	0.10	0.10	0.20
Desvio padrão (σ)	0.10	0.08	0.13	0.09
Percentil P_{10}	0.09	0.10	0.00	0.10
Percentil P_{90}	0.30	0.30	0.31	0.30
Nº de medidas	10	19	10	20

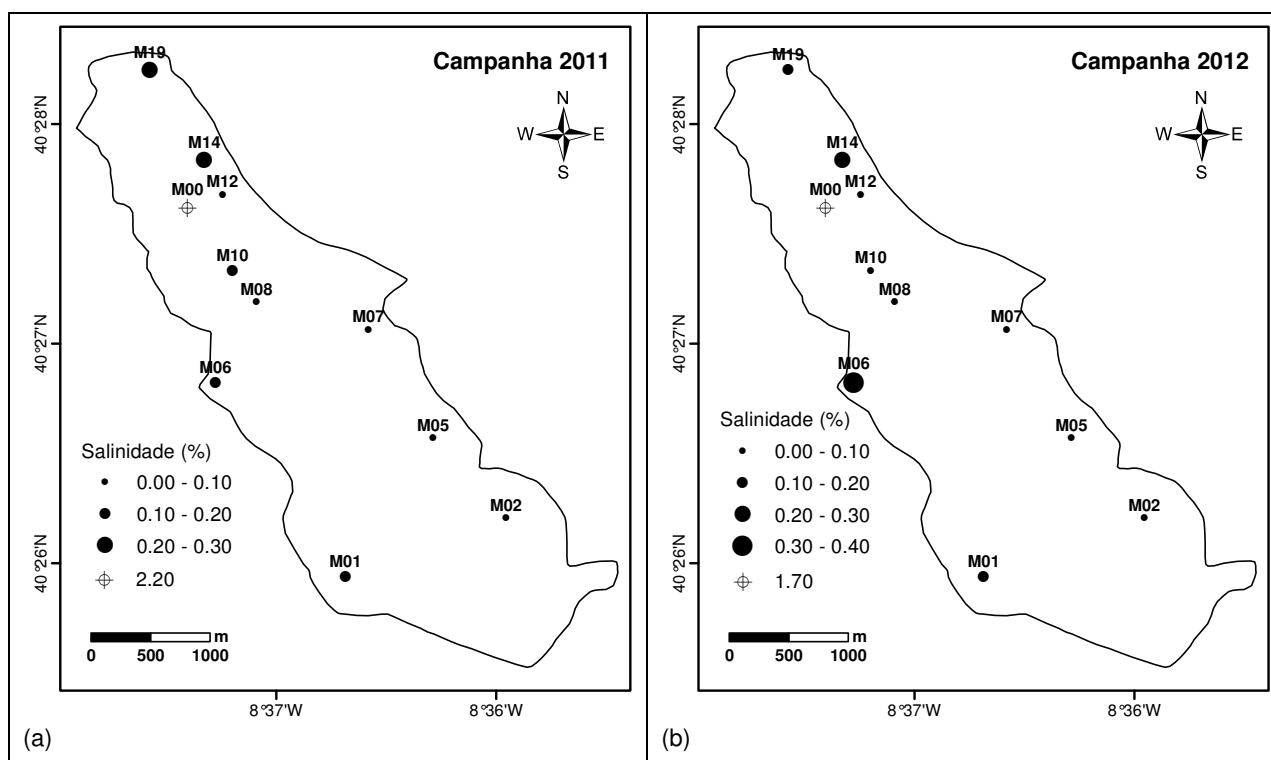


Figura 5.27 - Distribuição espacial da salinidade da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

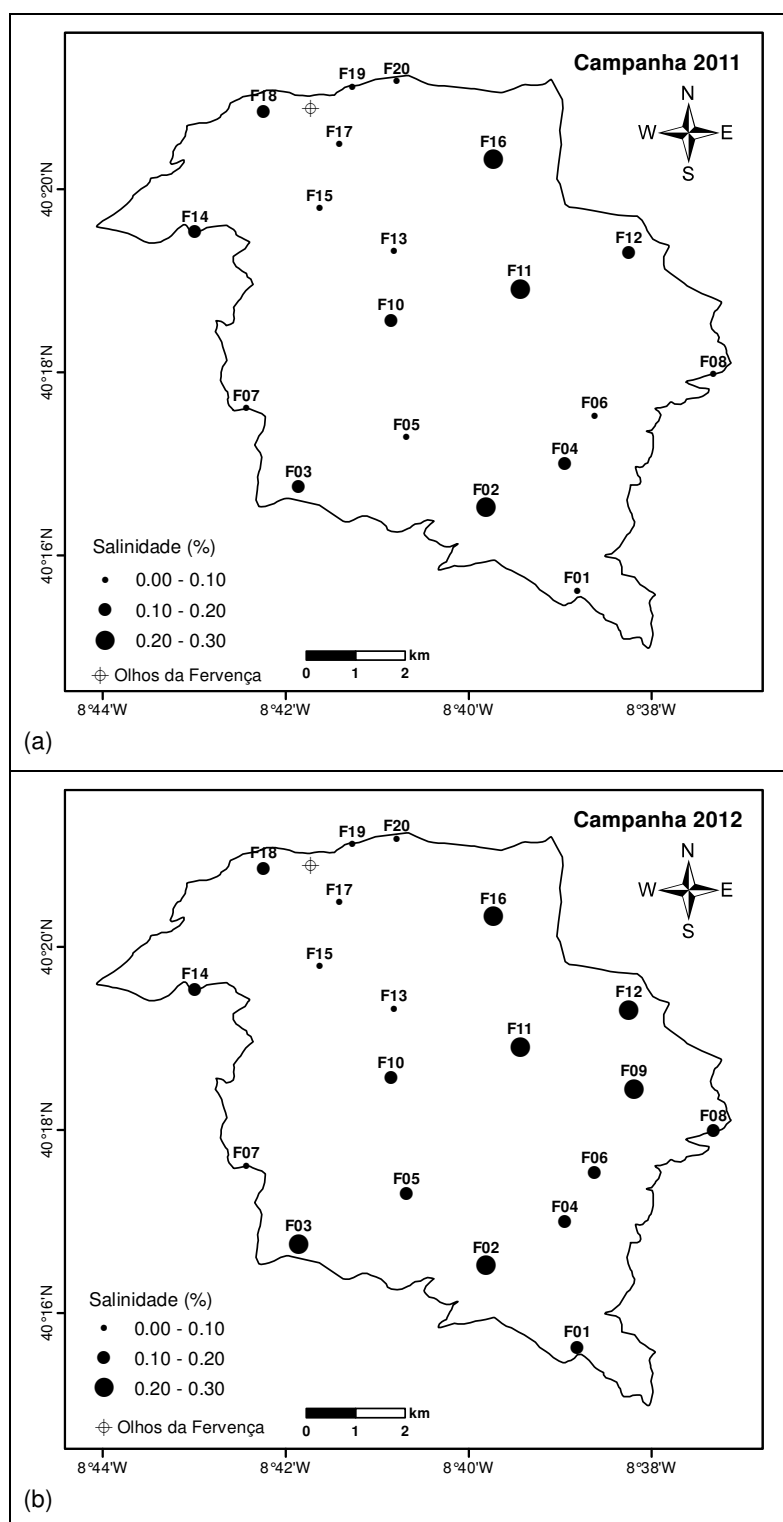


Figura 5.28 - Distribuição espacial da salinidade da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

5.2.2.5 - Oxigénio dissolvido

Os níveis de oxigénio dissolvido (OD) dependem das atividades físicas, químicas e bioquímicas desenvolvidas na água, tendo grande importância na solubilização e na precipitação de iões (processos redox). A sua presença na água está associada à dissolução do ar pela água da chuva (Pulido Carrillo, 1978), ou também à dissolução de gases do terreno não saturado ou a

processos de fotossíntese nas águas superficiais (Custodio & Llamas, 1983). Estes autores sustentam que, previamente à infiltração, a água pode estar sobressaturada em oxigénio, mas no terreno o oxigénio será consumido e a sua renovação é difícil ou impossível. A maioria das águas subterrâneas tem concentrações de oxigénio dissolvido de 0 a 5 mg/L, predominando valores abaixo de 2 mg/L (Custodio & Llamas, 1983), no entanto, Matthes (1982) refere que nas águas recentemente recarregadas atingem-se valores de 6 a 12 mg/L (*in* Andrade, 2004).

Os dados estatísticos das medidas de oxigénio dissolvido nas águas em estudo estão na Tabela 5.13, e na Figura 5.29 e na Figura 5.30 está a projeção dos respetivos valores.

Tabela 5.13 - Dados estatísticos dos valores de oxigénio dissolvido (mg/L) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferverença	Montouro	Ferverença
Média (μ)	9.09	9.40	9.50	9.20
Valor Máximo (MAX)	12.35	13.78	12.79	12.64
Valor Mínimo (MIN)	3.19	3.70	3.72	4.57
Moda (M_o)	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Mediana (P_{50})	9.47	9.44	10.78	9.12
Desvio padrão (σ)	2.53	2.59	3.20	2.37
Percentil P_{10}	6.96	6.26	4.88	5.79
Percentil P_{90}	11.39	12.40	12.07	11.70
Nº de medidas	10	19	10	20

#N/D - não determinável

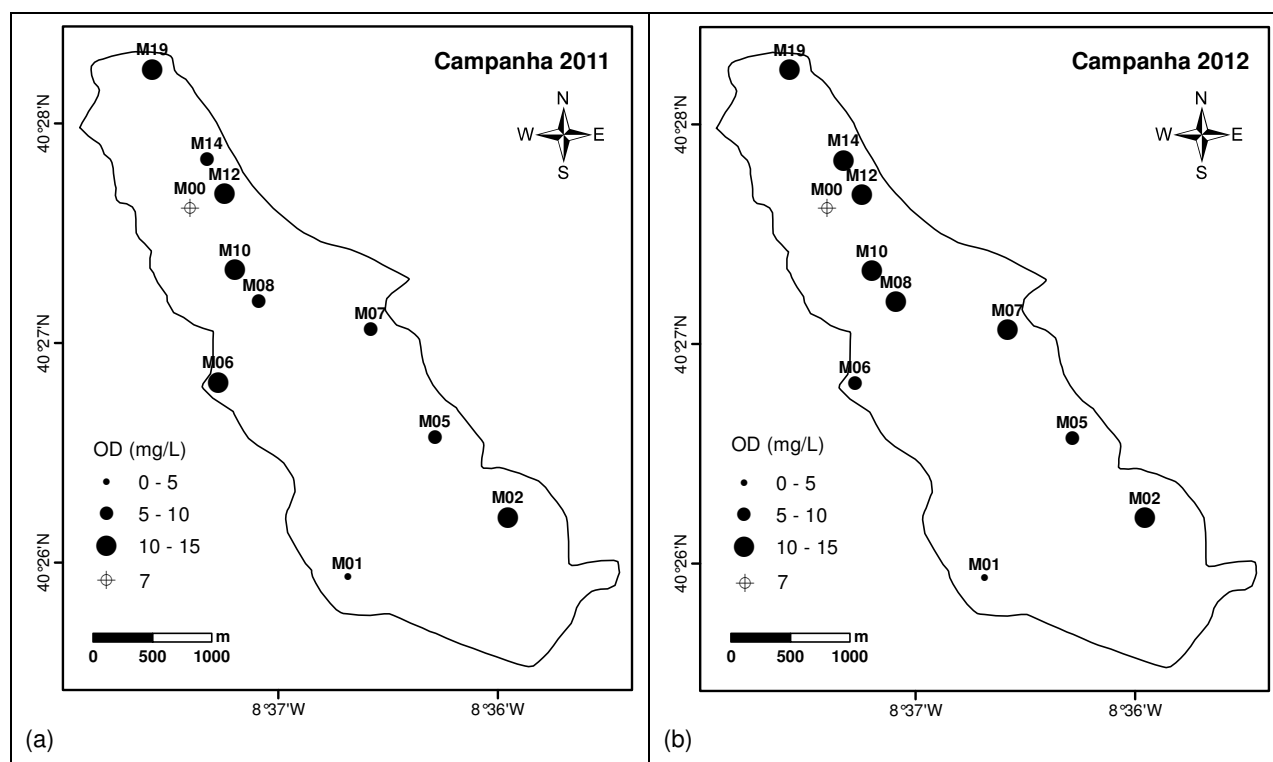


Figura 5.29 - Distribuição espacial do OD da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

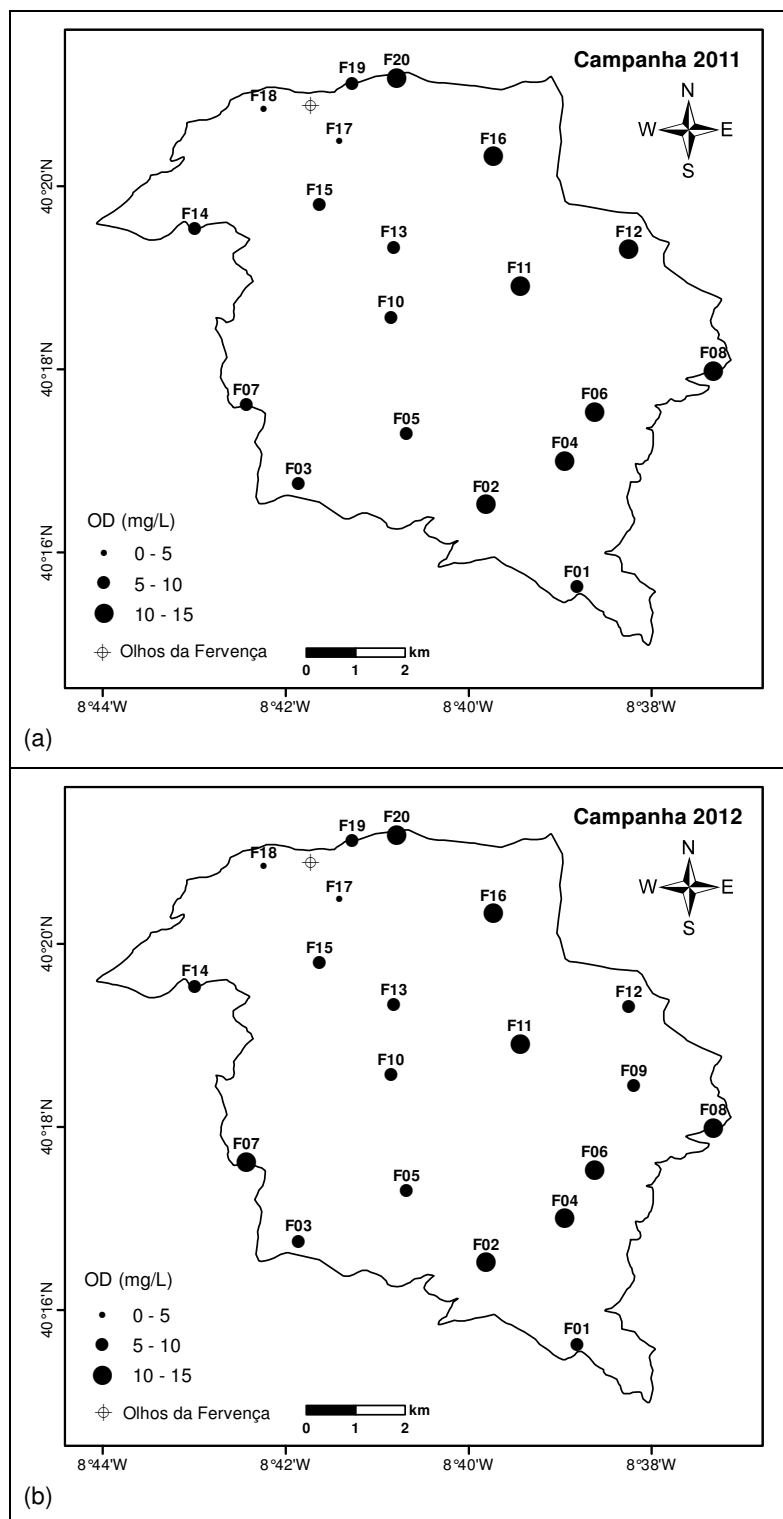


Figura 5.30 - Distribuição espacial do OD da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

As médias dos valores de oxigénio dissolvido são da mesma ordem de grandeza entre as duas campanhas, sendo que, no caso dos pontos de água de Montouro se verifica que no inverno esse valor é mais elevado, evidenciando o que é indicado por Andrade (2004), em que águas com maiores temperaturas dissolvem menos oxigénio. Na área de Ferverça constata-se que isto ocorreu em apenas 8 amostras, o que contribuiu para uma média inferior em 2012 relativamente a 2011. A maioria das amostras tem valores de OD inferiores a 12 mg/L, com

exceção de M12, F02, F11 e F16 em 2011, e M02 e F08 em 2012, que se apresentam ligeiramente superiores.

5.2.2.6 - Eh

As medições do potencial redox (Eh) dão-nos uma indicação qualitativa das condições de oxidação-redução de um meio, influenciadoras do comportamento de muitos constituintes químicos. Potenciais positivos indicam que o sistema é relativamente oxidante e potenciais negativos indicam que o sistema é relativamente redutor (Hem, 1985).

Os processos de redução e oxidação ocorrem através da transferência de eletrões de um átomo para outro e exercem um controlo importante nas concentrações naturais de O_2 , Fe^{2+} , SO_4^{2-} , H_2S , CH_4 , etc., nas águas subterrâneas (Appelo & Postma, 2005). Estes processos influenciam o percurso de poluentes como lixiviados de aterros ou de nitratos dos campos agrícolas.

O potencial redox numa solução aquosa geralmente diminui com o aumento do pH e da temperatura, segundo Matthess (1982) citado em Andrade (2004).

Os valores obtidos em campo (E_{meas}) foram posteriormente convertidos em valores de elétrodo de hidrogénio (Eh) de acordo com a temperatura da água, e o respetivo valor de referência (E_{ref}) estipulado pelo fabricante do equipamento de medição (equação [5.4]).

$$Eh = E_{meas} + E_{ref} \quad [5.4]$$

O tratamento estatístico dos valores convertidos de Eh está resumido na Tabela 5.14.

Os valores de Eh, com mínimo de aproximadamente 189 mV e máximo de 493 mV na totalidade das medições, encontram-se dentro do intervalo expectável, que segundo Custodio & Llamas (1983) é de 700 a -480 mV para as águas subterrâneas. As águas amostradas apresentam valores médios de Eh na ordem de 295 e 438 mV nas águas na MhM para a campanha de 2011 e 2012, respetivamente, e de cerca de 348 e 392 mV na BhF, respetivamente para 2011 e 2012; trata-se de valores característicos de meios aeróbios e oxidantes.

Denota-se que na campanha de 2012 (inverno, com menores temperaturas da água) os valores são na maioria dos pontos mais elevados, com exceção para F13, F18 e M00 (Figura 5.31 e Figura 5.32).

Tabela 5.14 - Dados estatísticos dos valores de Eh (mV) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferwença	Montouro	Ferwença
Média (μ)	295.2	347.6	438.5	392.1
Valor Máximo (MAX)	326.1	404.8	492.7	440.2
Valor Mínimo (MIN)	188.6	307.9	391.7	307.7
Moda (M_o)	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Mediana (P_{50})	305.6	346.1	441.9	409.7
Desvio padrão (σ)	41.4	27.0	37.7	36.7
Percentil P_{10}	260.5	311.3	392.8	345.1
Percentil P_{90}	324.9	380.1	481.6	425.3
Nº de medidas	10	19	10	20

#N/D - não determinável

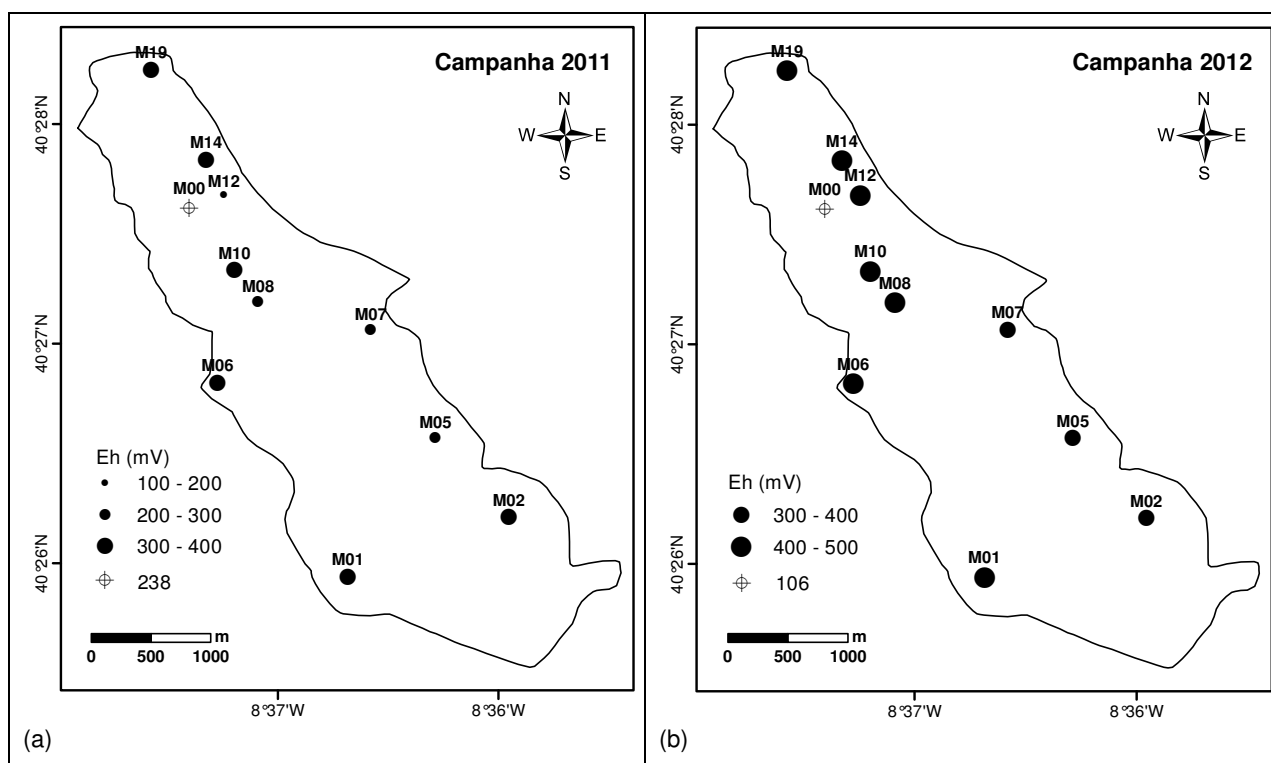


Figura 5.31 - Distribuição espacial do Eh da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

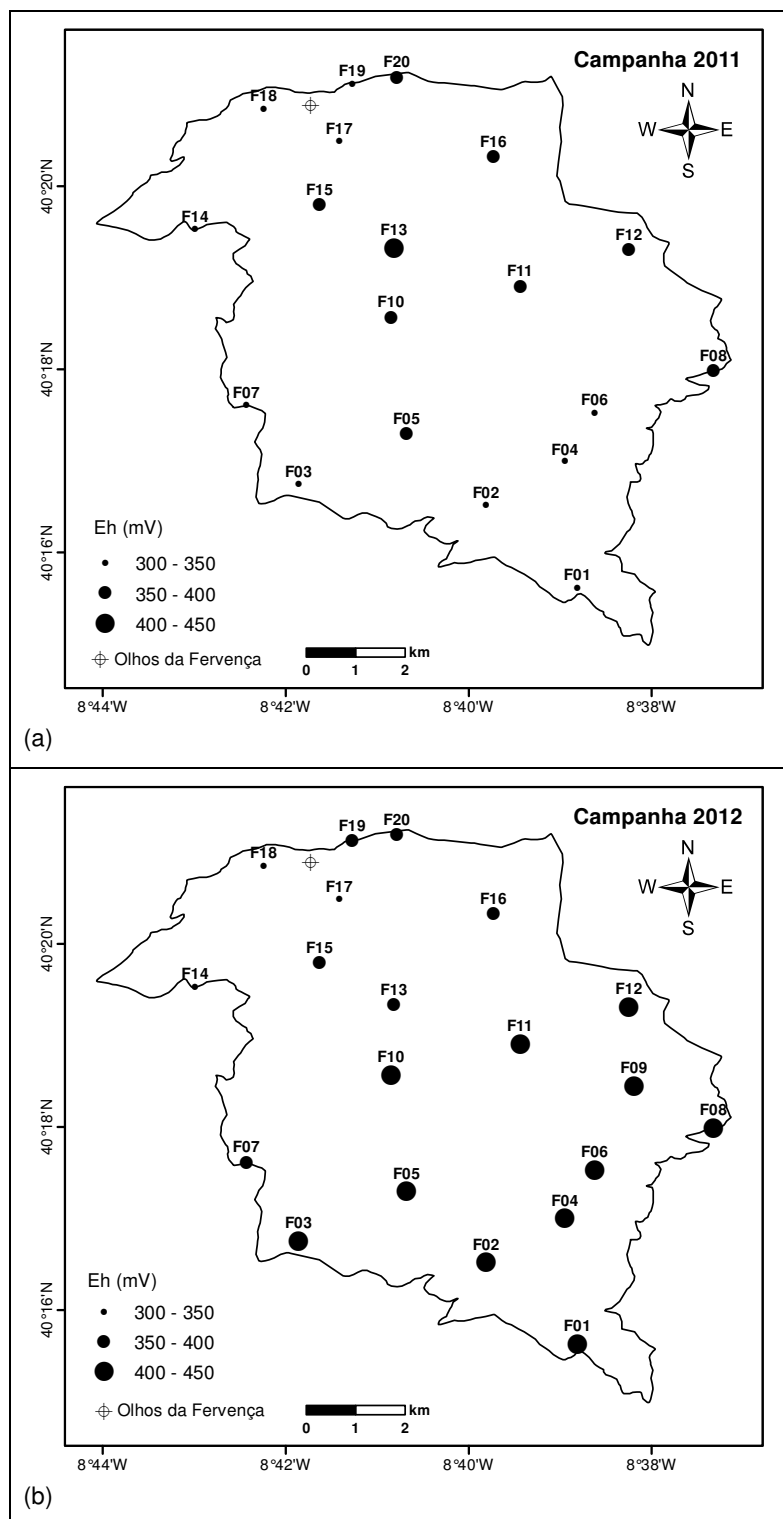


Figura 5.32 - Distribuição espacial do Eh da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

5.2.2.7 - Turbidez

A dificuldade da água para transmitir luz advém da presença de sólidos em suspensão, como argila, silte, matéria orgânica e inorgânica e organismos microscópicos, que dificultam a passagem da luz e a transmissão sem mudança de direção. A turbidez é uma propriedade ótica que expressa a dispersão da luz e a sua absorção.

Os parâmetros estatísticos desta propriedade estão sintetizados na Tabela 5.15 e a distribuição espacial dos registos em cada ponto de água está patente na Figura 5.33 e na Figura 5.34.

Em ambos os locais constata-se que a maioria das medições revela valores inferiores a 10 NTU, sendo alguns até muito reduzidos e próximos de 0 NTU. Exceções pontuais de M01, F17 e F19 em 2011 e de F07 e F13 em 2012, no entanto, valores perfeitamente aceitáveis e na mesma ordem de grandeza de alguns dos obtidos por Castilho (2008). A turbidez registada para a água da nascente de Montouro (36 e 12 NTU em 2011 e 2012, respetivamente) estará associada às condições de recolha da própria água junto do local da exurgência.

Tabela 5.15 - Dados estatísticos dos valores de turbidez (NTU) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferverça	Montouro	Ferverça
Média (μ)	5.65	5.96	3.40	5.66
Valor Máximo (MAX)	14.25	46.33	5.50	15.45
Valor Mínimo (MIN)	0.80	0.00	1.60	1.10
Moda (M_0)	#N/D	0.00	#N/D	1.10
Mediana (P_{50})	5.59	2.30	3.48	5.30
Desvio padrão (σ)	3.56	10.45	1.21	3.45
Percentil P_{10}	2.02	0.30	1.96	2.14
Percentil P_{90}	7.88	9.63	4.96	8.47
Nº de medidas	10	19	10	20

#N/D - não determinável

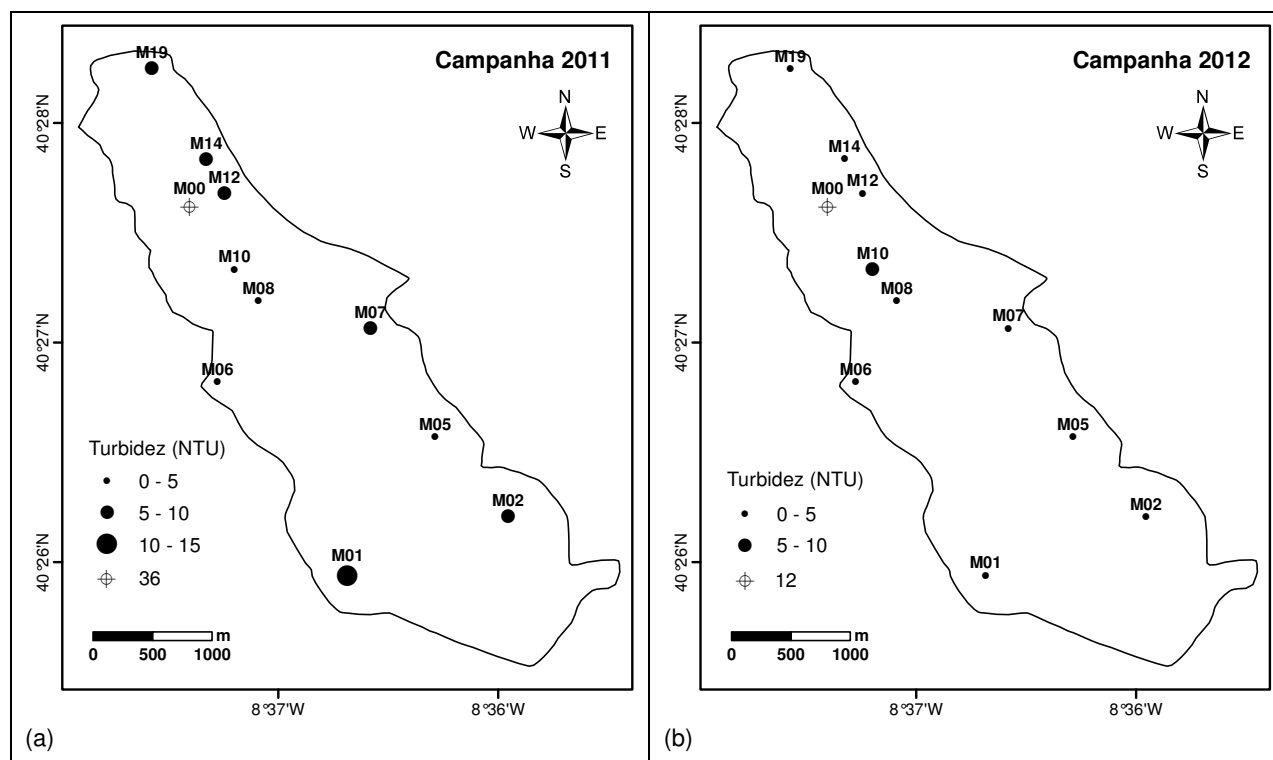


Figura 5.33 - Distribuição espacial da turbidez da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

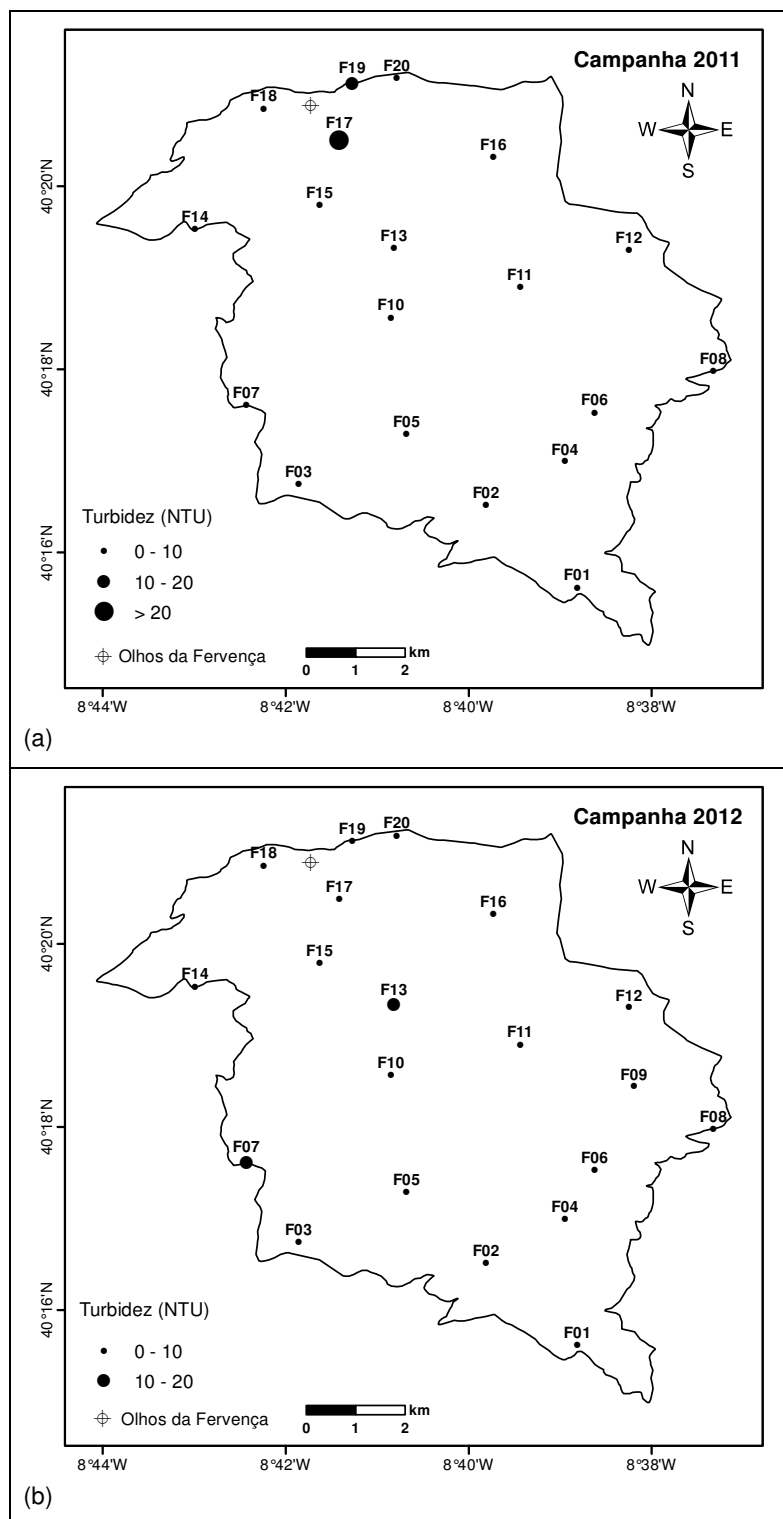


Figura 5.34 - Distribuição espacial da turbidez da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

5.2.2.8 - Bicarbonato

A capacidade da água em neutralizar ácidos é conhecida como alcalinidade. Nas águas naturais a alcalinidade resulta, essencialmente, da presença de carbonato, bicarbonato e hidróxido, no entanto, outros iões podem contribuir para a mesma como é o caso de boratos,

fosfatos, silicatos. O bicarbonato resulta da dissolução do CO₂ existente na atmosfera e nos carbonatos, fundamentalmente calcários e dolomias.

A quase totalidade das amostras tem pH inferior a 8,3, como tal, não existem quantidades importantes de ião carbonato (Custodio & Llamas, 1983), e Adams *et al.* (2001) referem que a variação do pH da água subterrânea entre 6,3 e 8,5 é um indicador que os carbonatos dissolvidos estão predominantemente na forma de ião bicarbonato (HCO₃⁻), isto é o que acontece no caso das águas em análise, sendo os resultados da alcalinidade expressos sob a forma deste ião. As concentrações mais frequentes do ião bicarbonato nas águas subterrâneas podem oscilar entre 50 e 400 mg/L (Pulido Carrillo, 1978), podendo chegar às vezes aos 800 mg/L (Custodio & Llamas, 1983).

Com base nos resultados da titulação *in situ*, obteve-se a alcalinidade total em mg/L de CaCO₃, que permitiram a determinação do ião bicarbonato, através do respetivo fator de conversão (no valor de 1.21928) resultante da relação entre as duas espécies e traduzida pela equação [5.5].



A projeção das medidas de bicarbonato está representada na Figura 5.35 e na Figura 5.36, enquanto a Tabela 5.16 sintetiza os resultados da estatística.

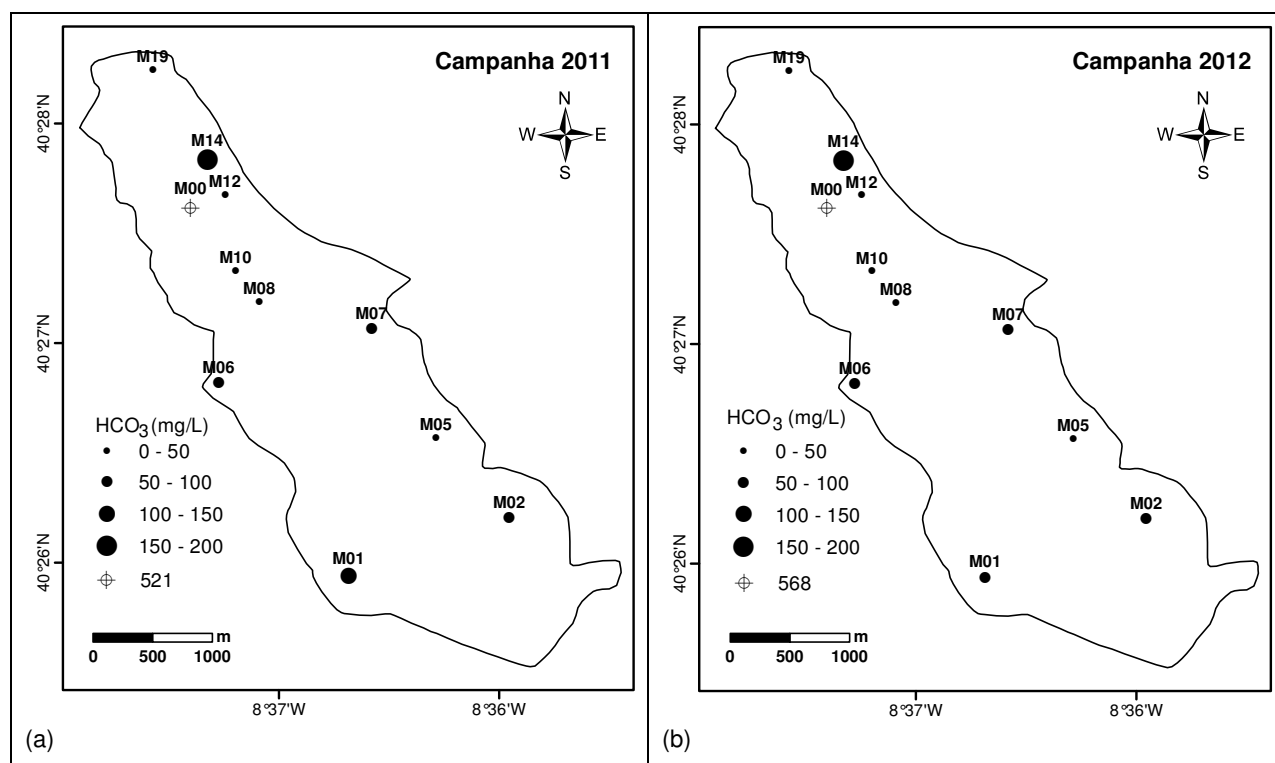


Figura 5.35 - Distribuição espacial do HCO₃ da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

Os registos de bicarbonato entre campanhas são relativamente constantes, com valores da mesma ordem de grandeza, denotando-se no geral uma variação positiva da campanha de 2011 para a de 2012, evidenciada pela médias ligeiramente mais elevadas em 2012, com

cerca de 65 mg/L para a zona de Montouro, e de 108 mg/L na zona de Ferverça, por comparação aos 62 e 91 mg/L, respetivamente por cada zona e em 2011. Todos os valores estão abaixo dos 400 mg/L, no entanto, existem vários pontos de amostragem com valores inferiores aos 50 mg/L de referência, como os 2 mg/L e 9 mg/L de M10, respetivamente nas campanhas de 2011 e 2012 (valores próximos dos da água da chuva (Adams *et al.*, 2001; Condeso de Melo, 2002)).

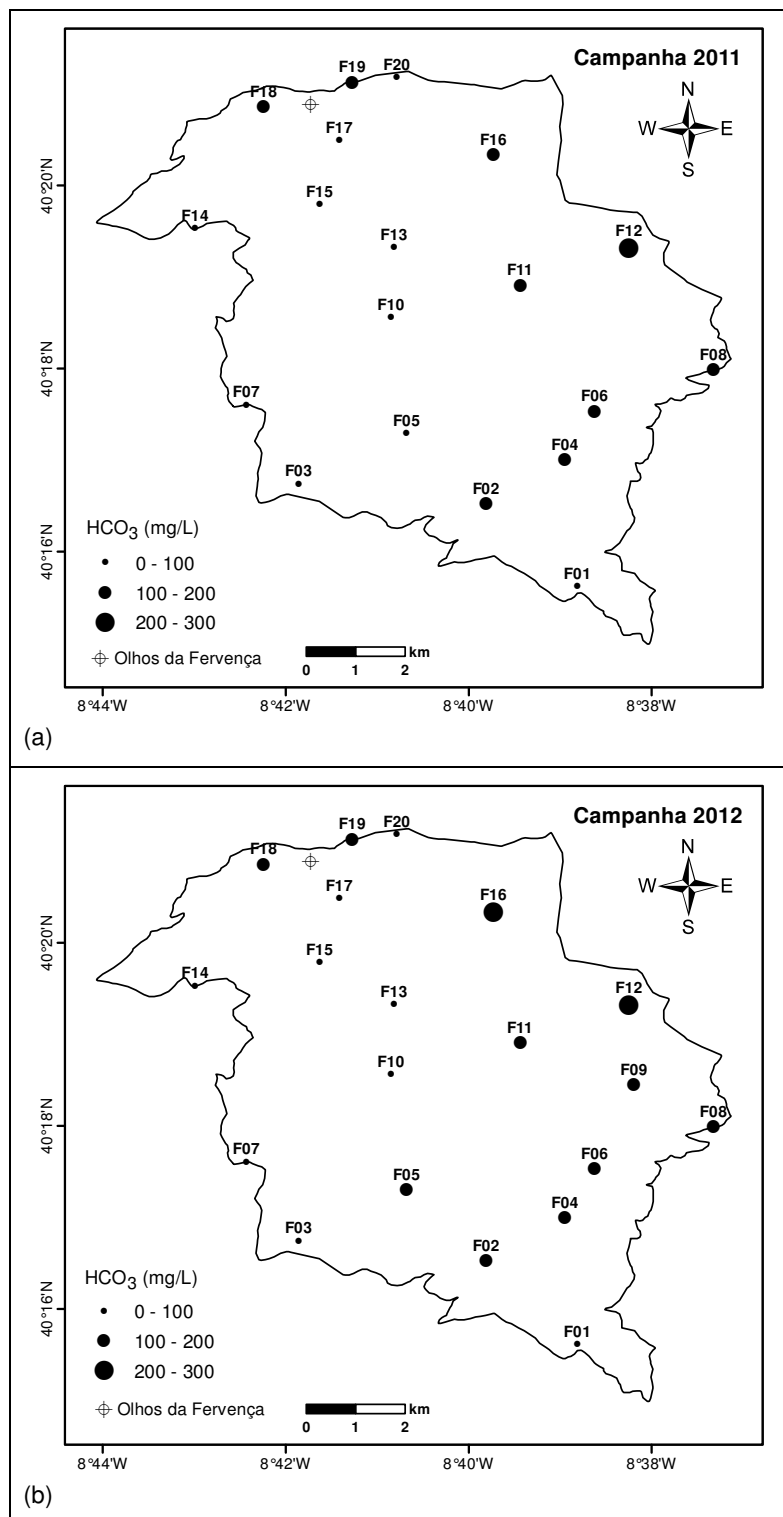


Figura 5.36 - Distribuição espacial do HCO_3^- da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

Tabela 5.16 - Dados estatísticos dos valores de bicarbonato (mg/L) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferveça	Montouro	Ferveça
Média (μ)	61.71	90.88	64.94	107.54
Valor Máximo (MAX)	156.19	251.66	190.21	219.96
Valor Mínimo (MIN)	2.32	21.34	9.21	24.75
Moda (M_o)	#N/D	#N/D	#N/D	143.88
Mediana (P_{50})	52.19	81.45	52.67	115.07
Desvio padrão (σ)	45.54	57.54	54.22	61.14
Percentil P_{10}	17.24	35.04	12.33	29.80
Percentil P_{90}	110.43	144.95	105.71	171.35
Nº de medidas	10	19	10	20

#N/D - não determinável

Na MhM o ponto de água M14 apresenta em ambas as campanhas o valor máximo de 156 e 190 mg/L em 2011 e 2012, respetivamente, o que poderá estar associado à prática de agricultura intensiva nas imediações de M14. Na nascente de Montouro o bicarbonato atinge valores muito mais elevados, na ordem de 521 e 568 mg/L em 2011 e 2012, respetivamente, em consonância com os altos valores de cloreto (Figura 5.37).

No caso da BhF, F12 tem o valor máximo em 2011 e dos mais elevados em 2012, mas nesta campanha o máximo registou-se em F16, podendo estes resultados advir da presença de calcários a SE dos pontos de água e da direção preferencial de escoamento (cartas piezométricas em 4.3.2).

5.2.2.9 - Cloreto

O ião cloreto é de difícil precipitação, sendo muito solúvel e estável em solução. Normalmente, está associado ao ião sódio, particularmente nas águas salgadas, e diretamente relacionado com o sabor salgado. Águas com quantidades mais reduzidas de cloreto podem evidenciar o sabor salgado desde que haja a associação com o sódio, ao contrário do que acontece na presença de catiões como cálcio e magnésio (Clesceri *et al.*, 1998).

A presença deste elemento na água deve-se a água marinha presa no interior dos sedimentos, da dissolução de sal comum e aos minerais afins que existem nas formações de evaporitos (Pulido Carrillo, 1978), nomeadamente sal-gema; poderá também proceder de esgotos urbanos e industriais (Custodio & Llamas, 1983).

As águas doces normalmente têm valores entre 10 e 250 mg/L, podendo existir águas com conteúdos muito maiores até vários milhares de mg/L (Custodio & Llamas, 1983).

Para as concentrações de cloreto obtidas nos pontos de amostragem executou-se o tratamento estatístico resumido na Tabela 5.17 e representou-se a distribuição espacial deste parâmetro (Figura 5.37 e Figura 5.38).

Tabela 5.17 - Dados estatísticos dos valores de cloreto (mg/L) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferveça	Montouro	Ferveça
Média (μ)	27.14	30.23	27.61	32.11
Valor Máximo (MAX)	42.99	51.98	47.99	70.48
Valor Mínimo (MIN)	14.00	15.00	11.93	7.20
Moda (M_o)	31.49	18.49	#N/D	28.99
Mediana (P_{50})	25.49	28.49	25.89	28.24
Desvio padrão (σ)	9.98	11.20	12.17	14.61
Percentil P_{10}	15.35	17.99	15.14	19.40
Percentil P_{90}	42.09	45.19	45.29	52.63
Nº de medidas	10	19	10	20

#N/D - não determinável

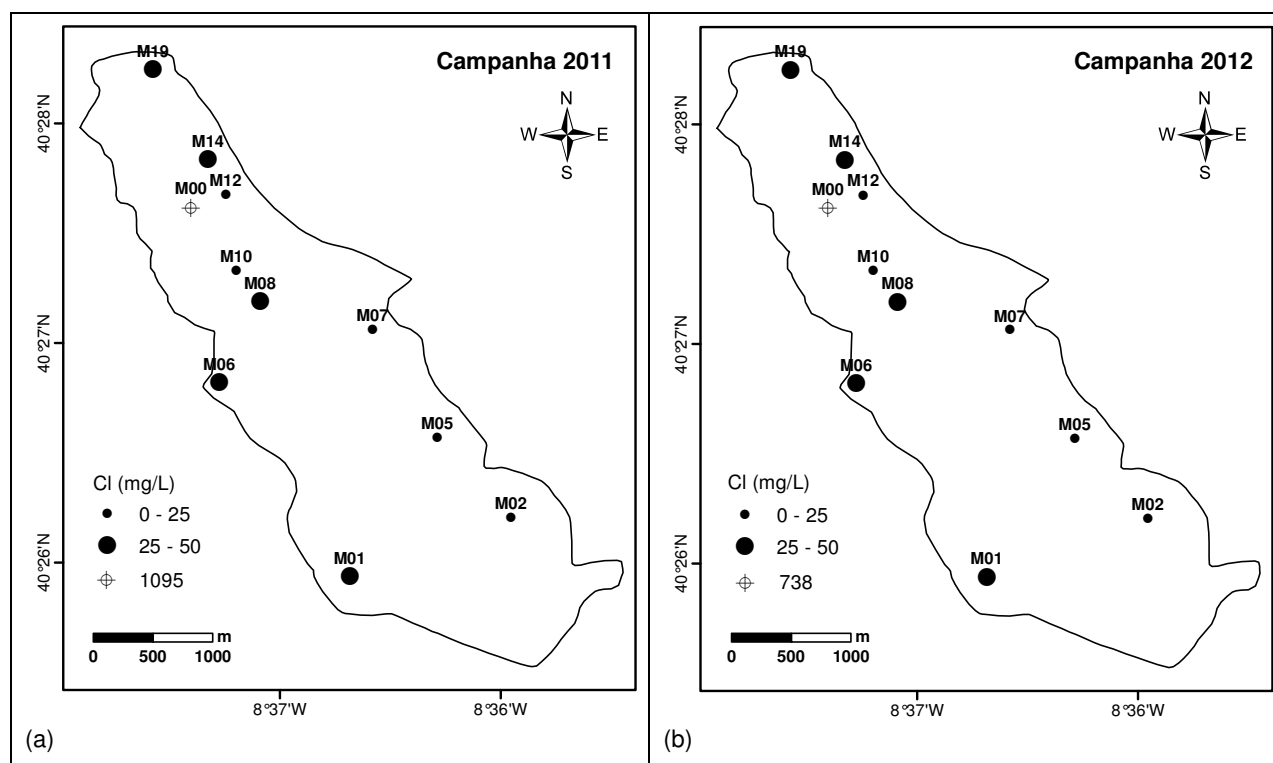


Figura 5.37 - Distribuição espacial do Cl da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

Os máximos de cloreto registaram-se para ambos os locais de estudo na colheita de 2012, com valores de 48 e 70 mg/L para a MhM e BhF, respetivamente.

Na região de Montouro as medidas são muito semelhantes entre as duas campanhas, com exceção para a nascente que apresenta uma redução significativa do valor de cloreto, passando de 1095 para 738 mg/L, no entanto, estes valores são consideravelmente mais elevados que os da vizinhança, sugerindo a possibilidade de circulação desta água através de formações evaporíticas que promovem o enriquecimento neste elemento. A mesma hipótese está referida no trabalho de Andrade (2004) para água em dois furos próximo de Alfarelos, a cerca de 35 km para SW da nascente de Montouro.

Na zona de Ferverença os pontos amostrados têm valores da mesma ordem de grandeza entre campanhas, com a maioria a denotar ligeiros aumentos em 2012 e alguns com pequenas descidas de valor.

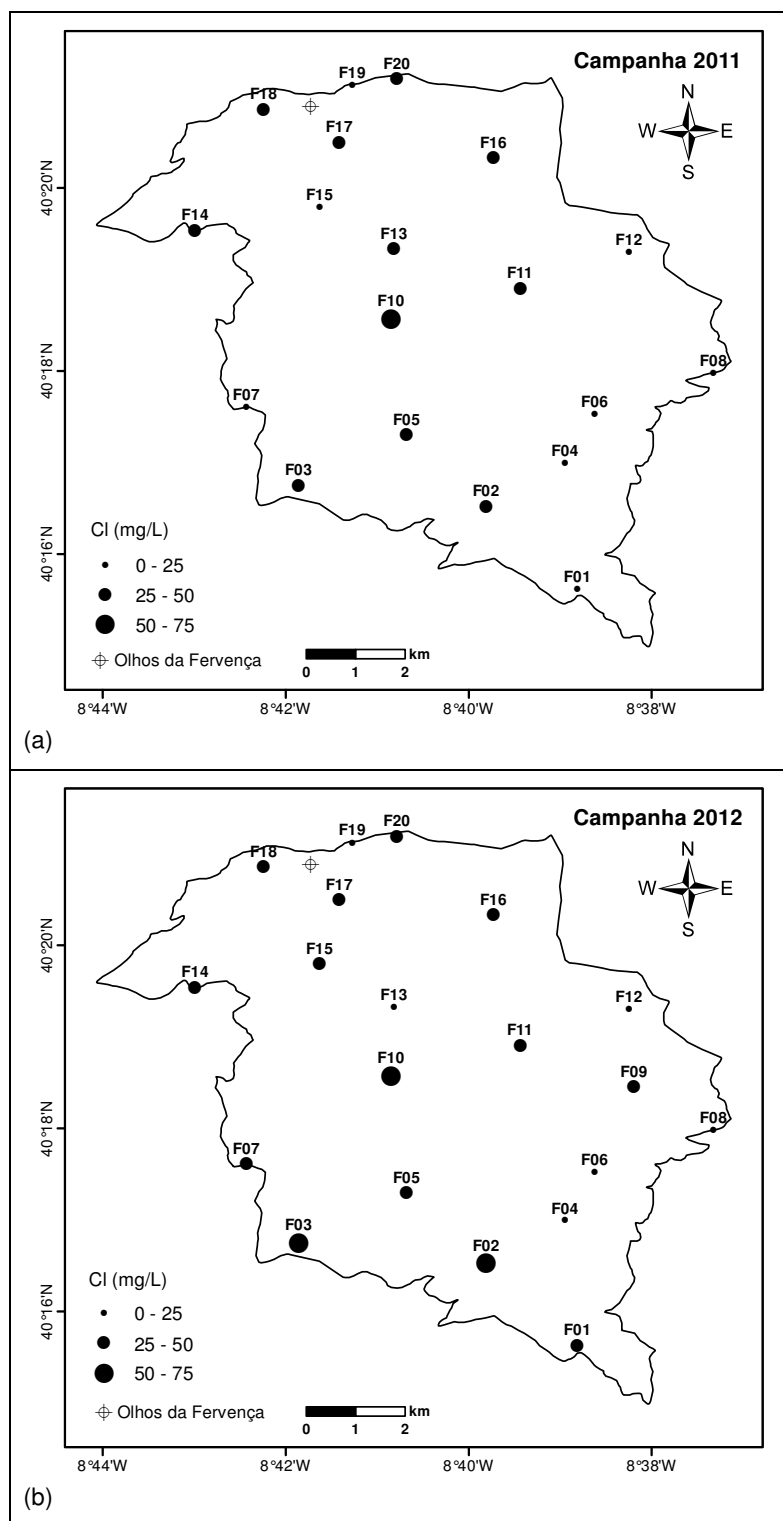


Figura 5.38 - Distribuição espacial do Cl da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

5.2.2.10 - Sulfato

A dissolução de minerais sulfatados (gesso, anidrite) contribui fortemente para a presença de sulfato na água, podendo também resultar da oxidação de sulfuretos, da concentração no solo da água da chuva e de atividades urbanas, industriais e agrícolas (Custodio & Llamas, 1983). Estes autores indicam para as águas doces valores de sulfato entre 2 e 150 mg/L, e no caso de águas salgadas concentrações que podem chegar aos 5000 mg/L se existir cálcio.

A projeção espacial do sulfato está na Figura 5.39 para a microbacia hidrográfica de Montouro, e na Figura 5.40 para a bacia hidrográfica de Ferverça, enquanto os parâmetros estatísticos deste elemento estão compilados na Tabela 5.18.

Entre a campanha de 2011 e 2012 verifica-se na MhM uma redução generalizada das medidas de sulfato, com exceção para M08 que subiu ligeiramente o valor. Os máximos são de cerca de 98 e 94 mg/L na colheita de 2011 e 2012, respetivamente, enquadrando-se perfeitamente no intervalo referido para as águas doces.

Na nascente de Montouro verificam-se os valores mais elevados comparativamente aos pontos de água envolventes, com 147 e 133 mg/L em 2011 e 2012, respetivamente, denotando uma ligeira redução de valor na segunda campanha, tendência coincidente com a das restantes águas analisadas na microbacia hidrográfica. Estes registos, apesar de inferiores a 150 mg/L, sobressaem pela concentração diferente dos demais pontos de amostragem indiciando possível influência de formações evaporíticas.

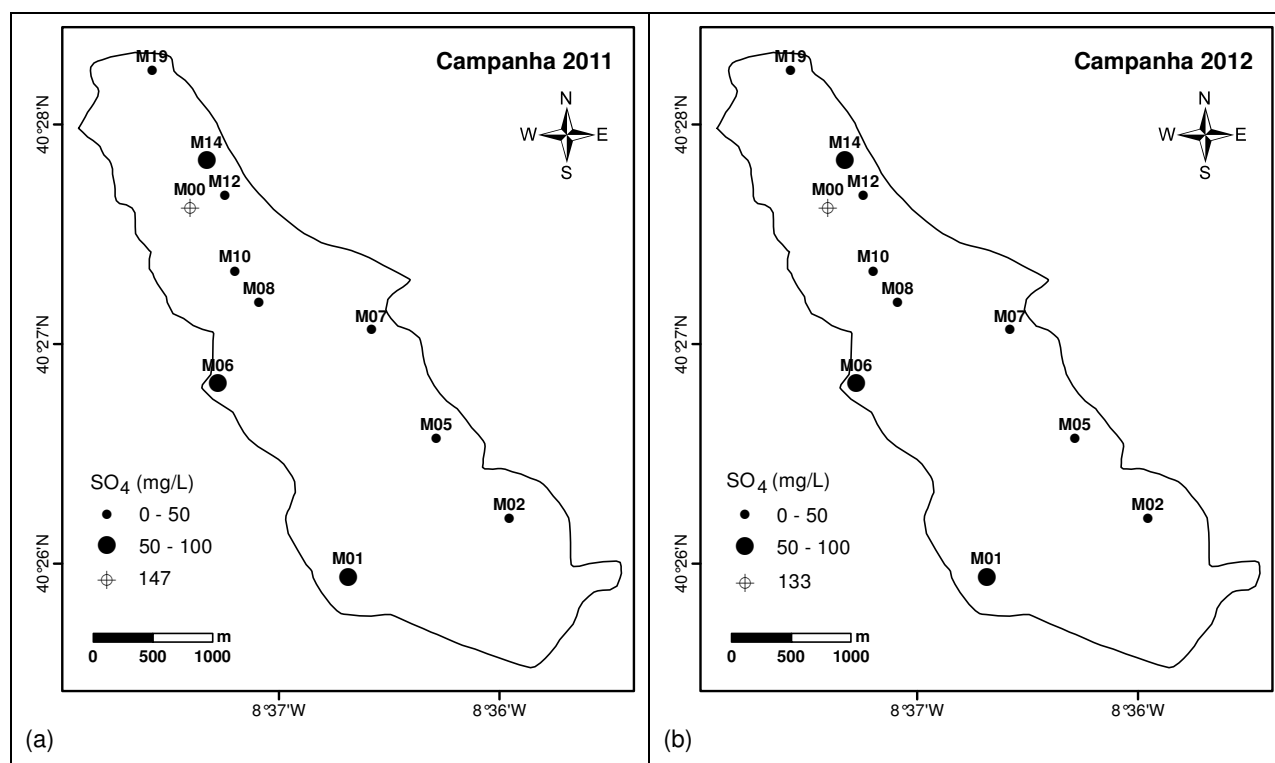


Figura 5.39 - Distribuição espacial do SO₄ da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

Na BhF os valores de SO_4 são, no geral, mais estáveis para as campanhas em análise, com pequenas flutuações descendentes (em cerca de metade das amostras) em 2012. O máximo foi sempre alcançado em F14, com 121 mg/L em 2011 e 129 mg/L em 2012. Os valores são característicos de águas doces e o valor mais alto estará associado a agroquímicos usados na agricultura ou a alguma contaminação por águas residuais domésticas ou, como indicado por Marques da Silva (2009), a evaporitos interestratificados nas formações.

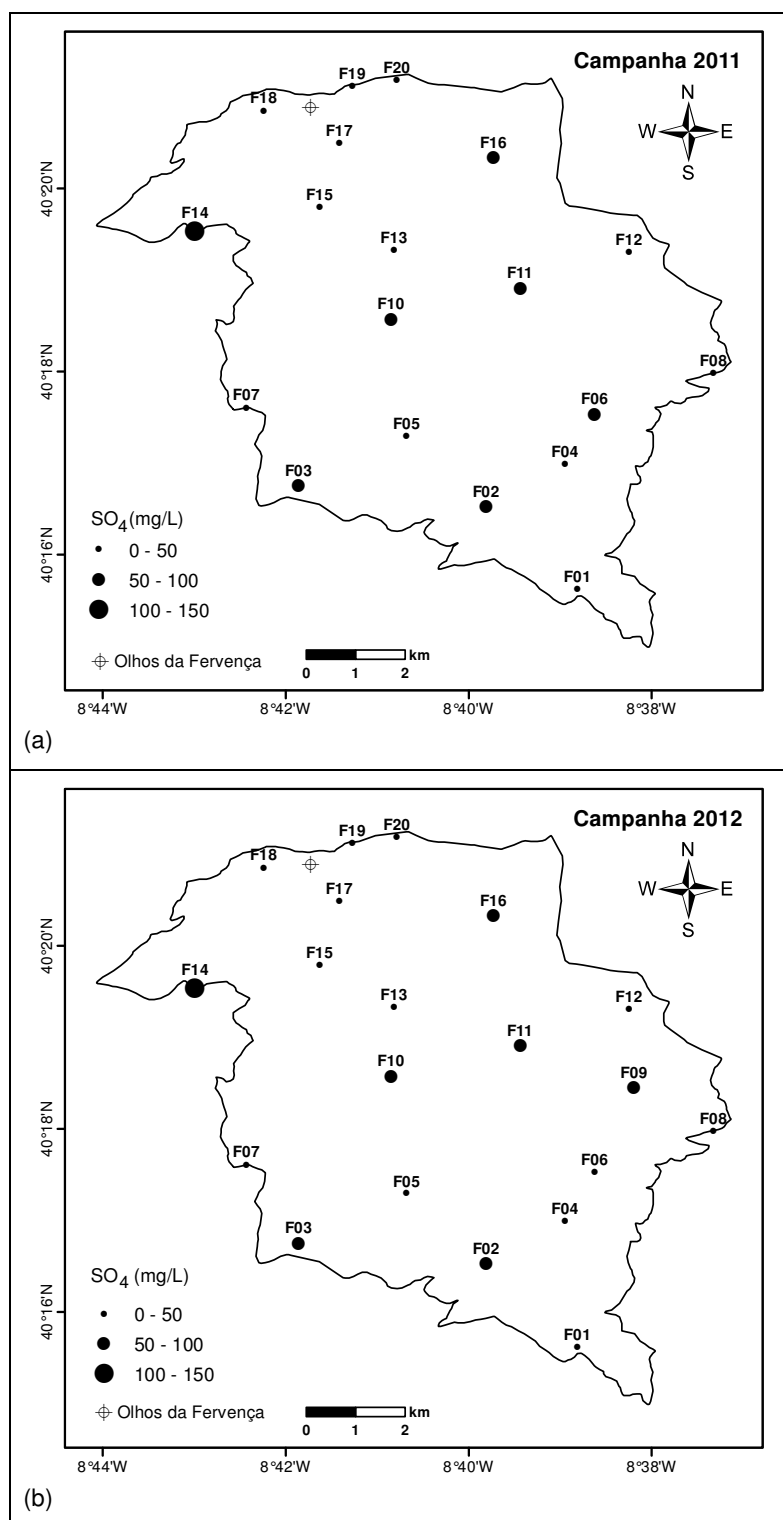


Figura 5.40 - Distribuição espacial do SO_4 da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

Tabela 5.18 - Dados estatísticos dos valores de sulfato (mg/L) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferveça	Montouro	Ferveça
Média (μ)	47.18	42.45	40.34	46.18
Valor Máximo (MAX)	97.50	121.47	93.69	128.83
Valor Mínimo (MIN)	8.33	7.61	14.88	7.87
Moda (M_0)	30.00	#N/D	#N/D	#N/D
Mediana (P_{50})	40.79	32.12	29.53	42.42
Desvio padrão (σ)	28.59	27.23	26.51	29.38
Percentil P_{10}	18.62	14.64	16.79	17.03
Percentil P_{90}	82.13	70.69	75.91	72.63
Nº de medidas	10	19	10	20

#N/D - não determinável

5.2.2.11 - Nitrato

As formas de nitrogénio são, por ordem de estado decrescente de oxidação, nitrato, nitrito, amónia e nitrogénio orgânico. Os nitratos ocorrem em quantidades traço em muitas águas superficiais, mas podem ter elevados valores em águas subterrâneas (Clesceri *et al.*, 1998), são por isso a espécie dominante de azoto na água subterrânea, seguida, em menor quantidade, pelo ião amónio (Domenico & Schwartz, 1997). Os sais de nitrato são muito solúveis, logo dificilmente precipitáveis (Custodio & Llamas, 1983).

Concentrações normais variam entre 0.10 e 10 mg/L segundo Custodio e Llamas (1983), no entanto, Pulido Carrillo (1978) indica um intervalo mais alargado até 30 mg/L, e refere que valores superiores a 60 mg/L provêm provavelmente de contaminação orgânica uma vez que algumas das fontes deste elemento são a decomposição de matéria orgânica, os processos de nitrificação natural, a contaminação industrial, agrícola e urbana e o uso de fertilizantes agrícolas. A água da chuva, em pequenas proporções, e, muito raramente, a lixiviação de minerais azotados podem constituir outras fontes deste elemento (Custodio & Llamas, 1983). Appelo & Postma (2005) consideram que a principal causa do aumento da concentração de nitrato em águas subterrâneas pouco profundas é a vasta aplicação de fertilizantes químicos e de estrumes na agricultura.

A Tabela 5.19 tem os parâmetros estatísticos das análises do nitrato e os resultados, para ambos os locais, são apresentados sob a forma bidimensional na Figura 5.41 e na Figura 5.42.

A maioria das amostras revela acréscimo de nitrato na campanha de 2012, oito em dez no caso da MhM e doze em 20 para a BhF, no entanto, em ambas as colheitas é no primeiro local de estudo referido que se atingem os máximos valores obtidos (121 e 255 mg/L em 2011 e 2012, respetivamente). Na zona de Ferveça o máximo foi de 111 e 157 mg/L, respetivamente em 2011 e 2012.

Amostras com valores até 10 mg/L temos seis (2012) a sete (2011) na BhF, e três (2012) a quatro (2011) na MhM, enquanto se considerarmos os 30 mg/L, passamos a ter nove na zona de Ferveça e cinco na zona de Montouro. Em todo o caso, amostras com nitrato acima de 60 mg/L são três (2011) a quatro (2012) no caso da MhM, e no caso da BhF são cinco (2011) a seis (2012). De salientar o aumento mais significativo deste parâmetro em M06 (passa de 87

para 255 mg/L em 2012) e F03 (varia de 86 para 157 mg/L em 2012). Estes últimos valores parecem ser indicadores de contaminação e, tendo em conta que nos locais em estudo existem muitos campos agrícolas (alguns com produção intensiva de milho) e hortícolas, capoeiras e estábulos bem como casas com fossas sépticas, justificarão os resultados obtidos.

A nascente de Montouro tem valores de 5 e 4 mg/L, perfeitamente normais para as águas subterrâneas e isentos de contaminação.

Tabela 5.19 - Dados estatísticos dos valores de nitrato (mg/L) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferveça	Montouro	Ferveça
Média (μ)	43.79	38.89	73.52	47.67
Valor Máximo (MAX)	120.56	111.07	254.59	156.65
Valor Mínimo (MIN)	1.97	0.71	3.50	1.09
Moda (M_o)	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Mediana (P_{50})	33.19	31.79	35.53	36.92
Desvio padrão (σ)	45.90	37.02	85.27	46.95
Percentil P_{10}	2.62	1.15	6.93	3.22
Percentil P_{90}	110.39	93.75	182.08	126.32
Nº de medidas	10	19	10	20

#N/D - não determinável

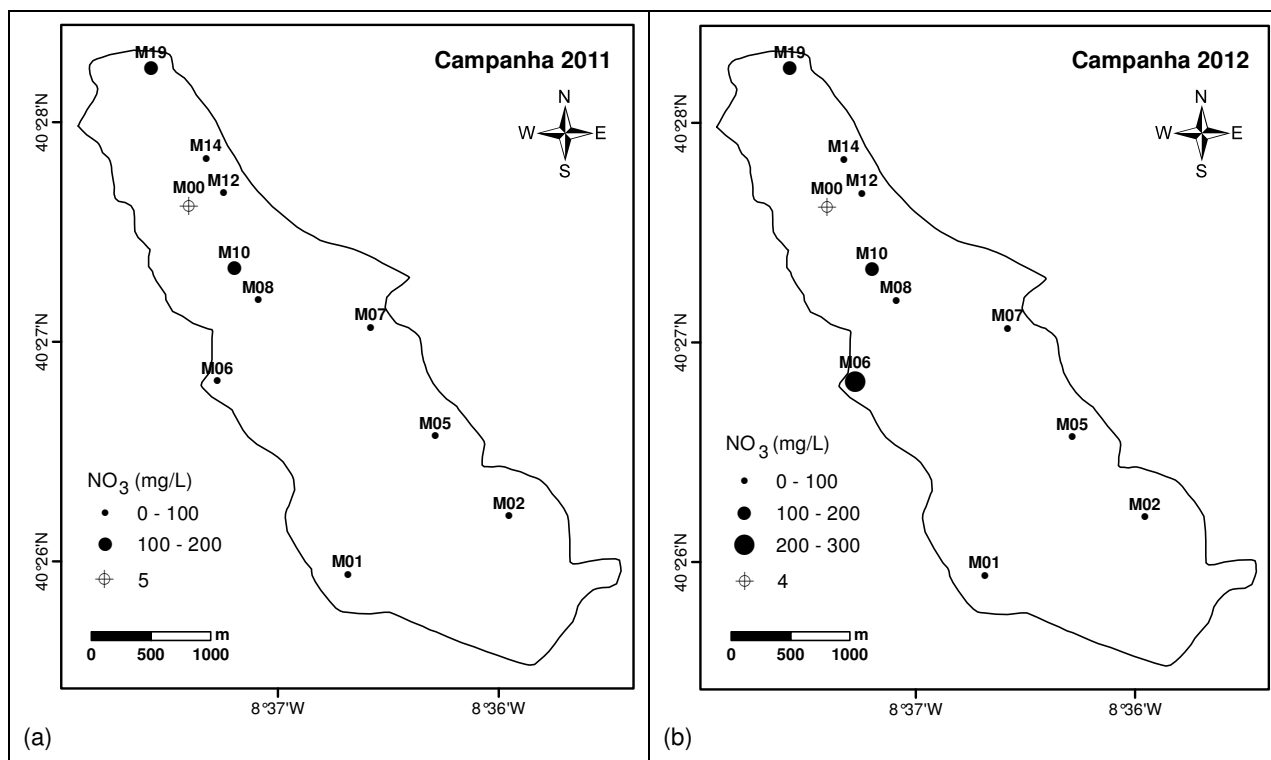


Figura 5.41 - Distribuição espacial do NO_3 da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

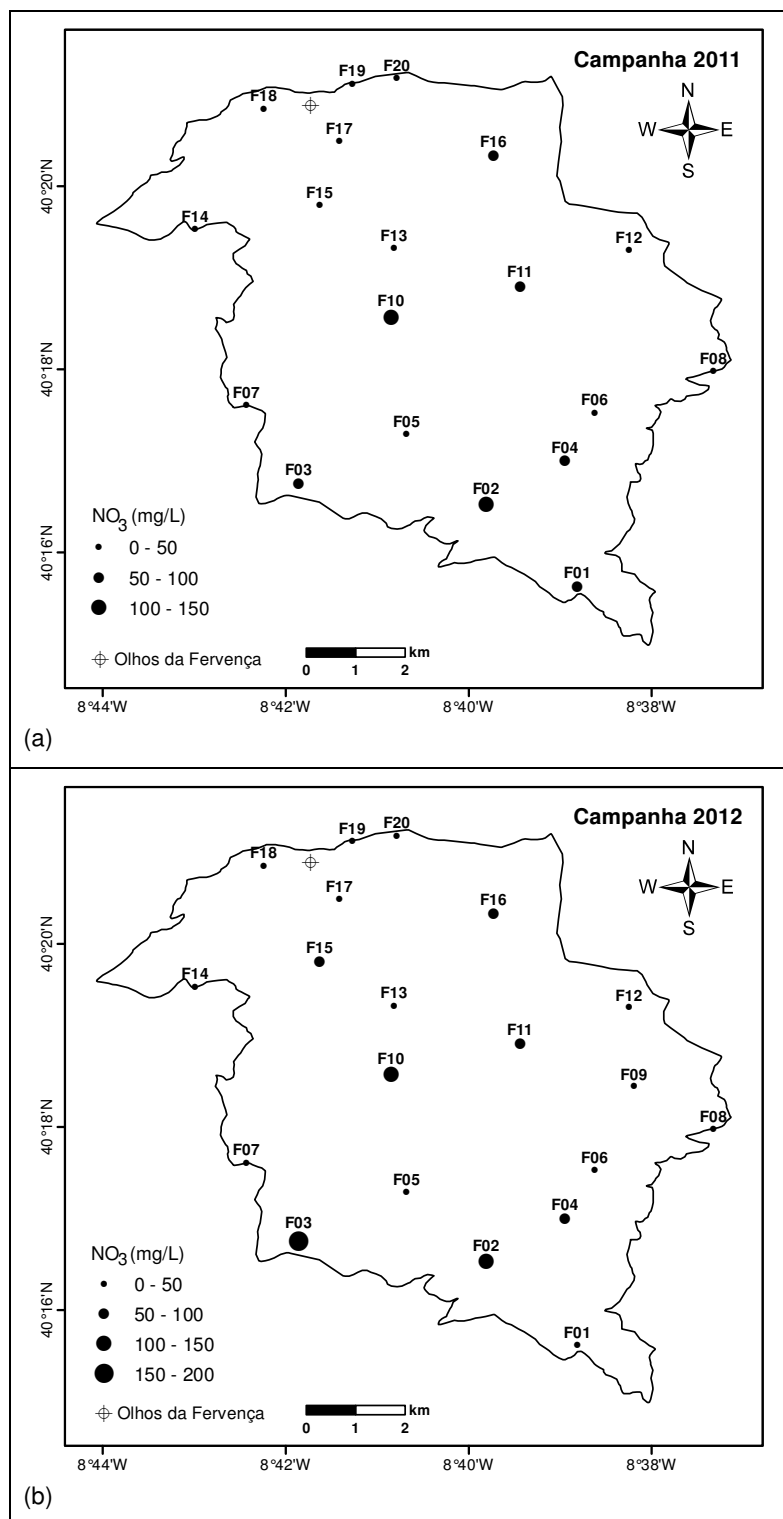


Figura 5.42 - Distribuição espacial do NO₃ da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

5.2.2.12 - Fosfato

Sempre que sais solúveis de fosfato estão presentes na água (na maioria são poucos), apresentam concentrações de 0.01 a 1 mg/L, podendo chegar a 10 mg/L e excepcionalmente a 50 mg/L (Custodio & Llamas, 1983). Por vezes os valores elevados do ião são consequência de poluição antropogénica, sendo que Clesceri *et al.* (1998) indicam como origem do elemento

as águas residuais com ou sem tratamento (resíduos humanos e de alimentação, detergentes), drenagem agrícola (fertilizantes fosfatados) e determinados lixos industriais.

Hem (1985) indica que o enriquecimento de um corpo de água com nutrientes, iões ou componentes orgânicos que contém nitrogénio ou fósforo (Domenico & Schwartz, 1997), é acompanhado por uma elevada taxa de produção de material vegetal na água; consequentemente, o uso de fósforo pela vegetação aquática e talvez associado com a adsorção de iões de fosfato por óxidos metálicos, especialmente óxidos e hidróxidos de ferro e de manganês, pode impedir concentrações maiores do que alguns décimos ou centésimos de mg/L de estarem presentes em solução na maioria das águas. Domenico & Schwartz (1997) referem que normalmente, a contaminação por fosfatos é considerada em conjunto com os nitratos, no entanto, é menos importante devido à baixa solubilidade dos componentes de fosfato na água subterrânea e à mobilidade limitada resultante da sua tendência para adsorver em sólidos.

Os valores determinados em cada ponto de amostragem estão representados na Figura 5.43 e na Figura 5.44, e os resultados da estatística do fosfato encontram-se na Tabela 5.20.

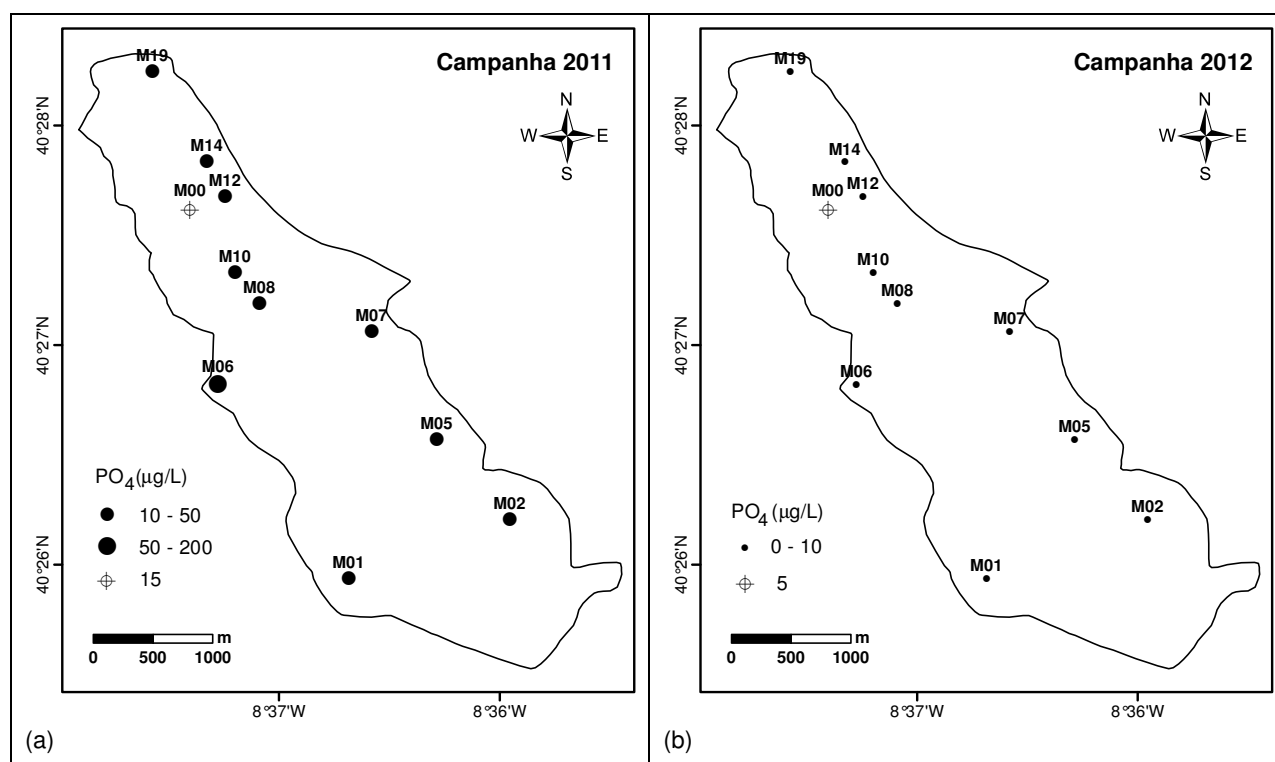


Figura 5.43 - Distribuição espacial do PO₄ da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

Todos os valores de fosfato são inferiores a 1 mg/L e tiveram redução generalizada na amostragem de 2012, com exceção para quatro pontos de água na BhF (no entanto, a variação que ocorreu nestes pontos de amostragem foi pequena).

O máximo valor na MhM foi registado em M06 para ambas as campanhas, com 195 e 10 µg/L em 2011 e 2012, respetivamente. Estes máximos estão dentro dos limites aceitáveis para as concentrações deste ião, no entanto, é de salientar o valor substancialmente maior medido em

2011, que poderá ter ligação com a aplicação pontual de algum fertilizante ou a existência de alguma libertação de esgotos domésticos de casas situadas nas proximidades.

A concentração de fosfato na nascente de Montouro segue o mesmo comportamento, baixando de 15 µg/L em 2011 para 5 µg/L em 2012, sem revelar efeitos de contaminação.

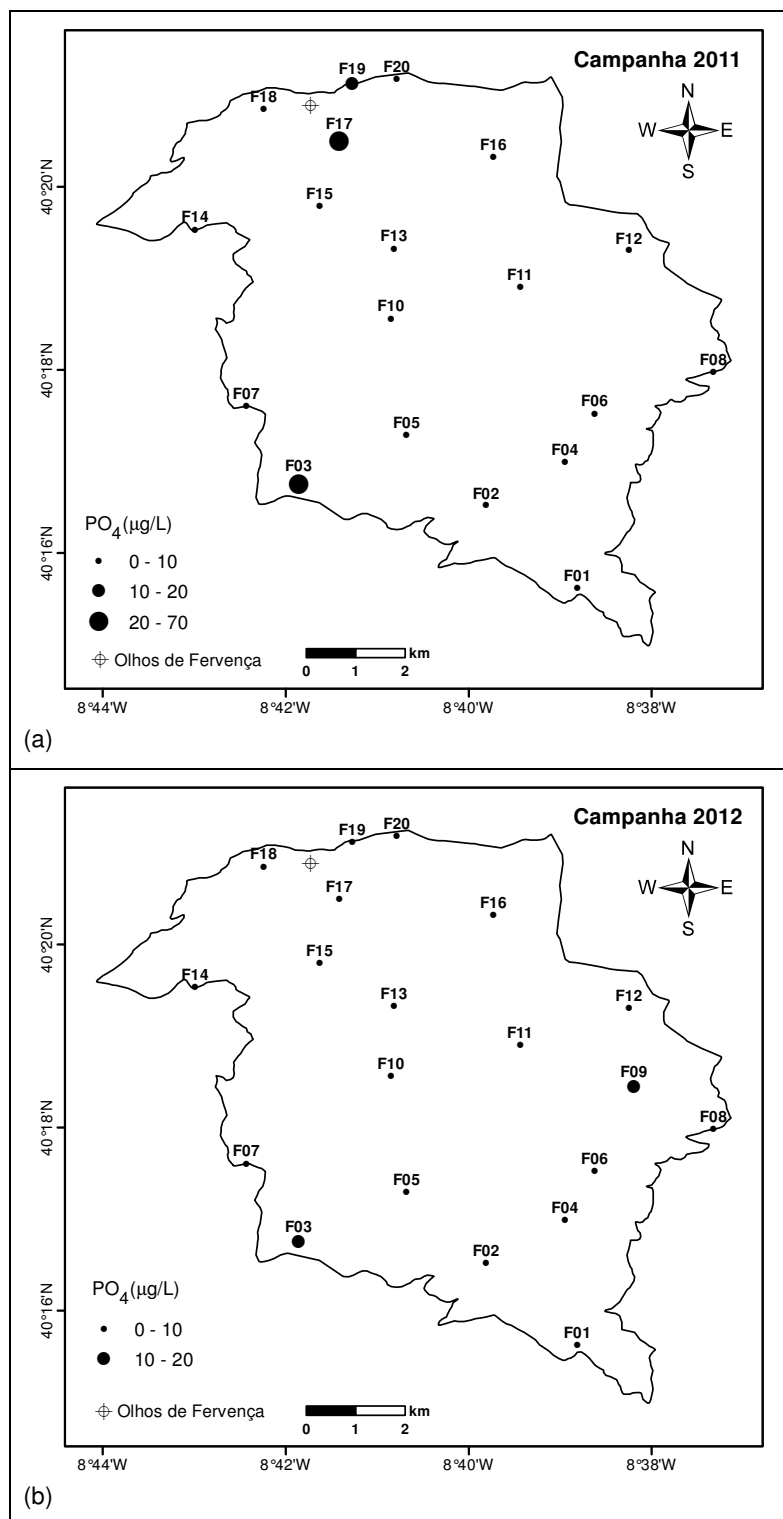


Figura 5.44 - Distribuição espacial do PO_4 da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

No caso da BhF, os máximos obtidos têm valores pouco expressivos (61 µg/L em F17 em 2011, e 20 µg/L em F09 em 2012) estando também incluídos nos valores admissíveis para águas subterrâneas.

Tabela 5.20 - Dados estatísticos dos valores de fosfato (µg/L) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferveça	Montouro	Ferveça
Média (μ)	40.37	10.11	3.53	5.68
Valor Máximo (MAX)	194.92	60.93	10.22	19.84
Valor Mínimo (MIN)	14.15	3.29	1.70	0.94
Moda (M_o)	21.23	4.11	1.70	1.88
Mediana (P_{50})	21.23	4.93	2.56	5.41
Desvio padrão (σ)	55.10	14.59	2.68	5.01
Percentil P_{10}	17.34	4.11	1.70	1.88
Percentil P_{90}	60.89	17.87	5.62	9.09
Nº de medidas	10	19	10	20

5.2.2.13 - Cálcio

O catião de cálcio está associado à dureza que as águas apresentam, ocorrendo sob a forma de bicarbonato e menos frequentemente como carbonato. É um dos constituintes principais da água e um dos seus elementos mais abundante, resultante de circulação através de calcários, dolomias e gesso, bem como do ataque a feldspatos e outros silicatos com cálcio, da dissolução do cimento carbonatado das rochas e da concentração da água da chuva (Custodio & Llamas, 1983). A solubilidade do carbonato de cálcio é controlada pelo pH e CO_2 dissolvido (Custodio & Llamas, 1983; Clesceri *et al.*, 1998) ou pela disponibilidade de sulfato (Hem, 1985). Segundo Matthess (1982), citado em Andrade (2004), os íons de cálcio são removidos da água subterrânea pela troca iónica com sódio ou outros íons, ocorrendo o processo recíproco de substituição de Ca por Na geralmente no limite entre água doce e água salgada cloretada sódica.

A concentração de cálcio numa água subterrânea normalmente varia de 10 a 100 mg/L (Feitosa & Filho, 2000), sofre um forte incremento em terrenos cálcicos e pode atingir 600 mg/L na presença de gesso (Custodio & Llamas, 1983).

Os dados estatísticos relativos ao íon cálcio estão sintetizados na Tabela 5.21, e a Figura 5.45 e a Figura 5.46 contém a distribuição espacial do parâmetro.

A maioria das amostras evidenciou concentrações de Ca iguais ou superiores na colheita de 2012, o que é refletido no acréscimo do valor médio deste elemento em ambos os locais de estudo comparativamente à primeira colheita.

Na MhM, a máxima concentração registada em 2011 foi de 72 mg/L em M14 que em 2012 aumentou para 91 mg/L, mas deixou de deter o máximo valor da região que passou para M06 com cerca de 113 mg/L, constituindo uma duplicação dos 55 mg/L de 2011. Este aumento acentuado na amostra M06 verifica-se também noutros parâmetros como SEC, HCO_3 , NO_3 , Mg

e menos notório em Cl e Na, apontando na possível confirmação de contaminação antrópica já referida anteriormente em 5.2.2.11.

Na nascente de Montouro os valores de cálcio são muito superiores aos dos restantes pontos de água (228 e 219 mg/L em 2011 e 2012, respetivamente) mostrando sinais de possível influência de dissolução de gesso.

Tabela 5.21 - Dados estatísticos dos valores de cálcio (mg/L) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferveça	Montouro	Ferveça
Média (μ)	43.69	48.11	55.16	59.07
Valor Máximo (MAX)	71.80	98.50	112.60	107.10
Valor Mínimo (MIN)	14.90	13.40	16.15	15.64
Moda (M_0)	#N/D	48.20	#N/D	#N/D
Mediana (P_{50})	43.45	43.90	46.89	54.32
Desvio padrão (σ)	19.65	24.18	31.57	26.95
Percentil P_{10}	20.03	22.60	23.04	25.29
Percentil P_{90}	68.02	80.64	93.52	92.95
Nº de medidas	10	19	10	20

#N/D - não determinável

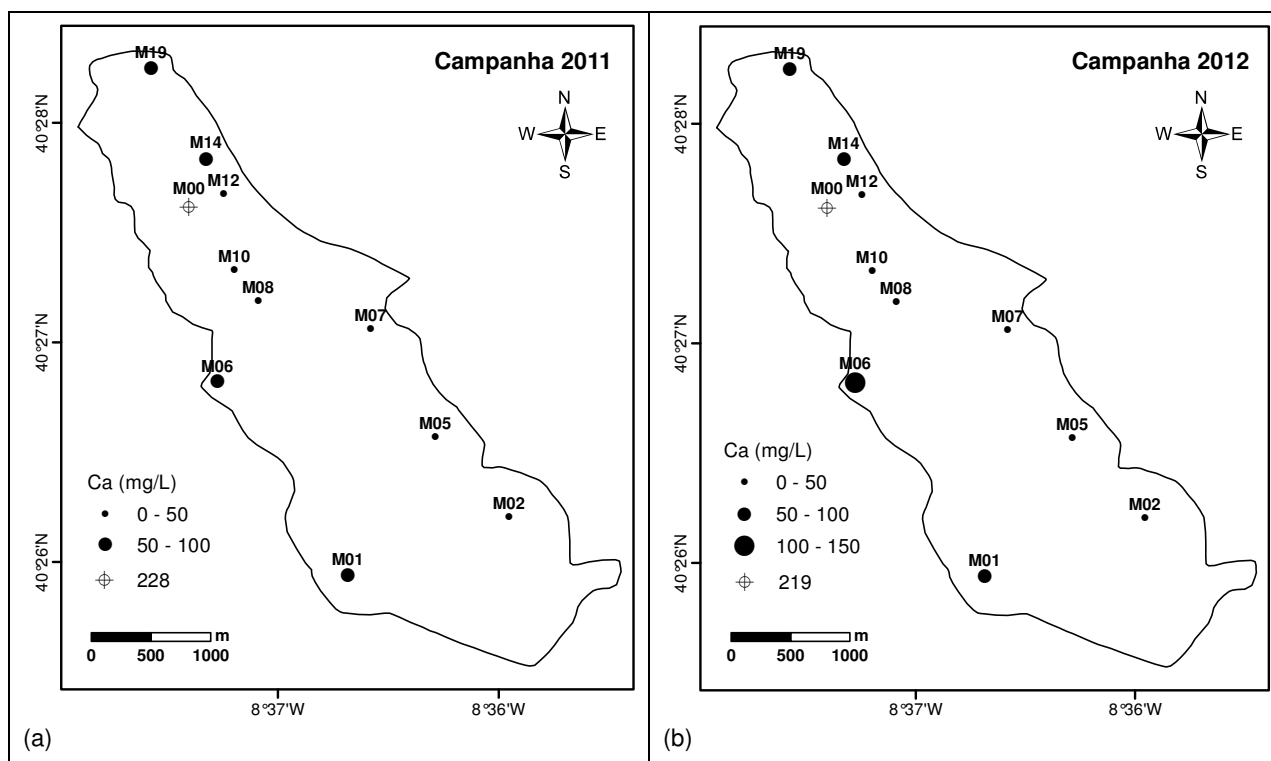


Figura 5.45 - Distribuição espacial do Ca da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

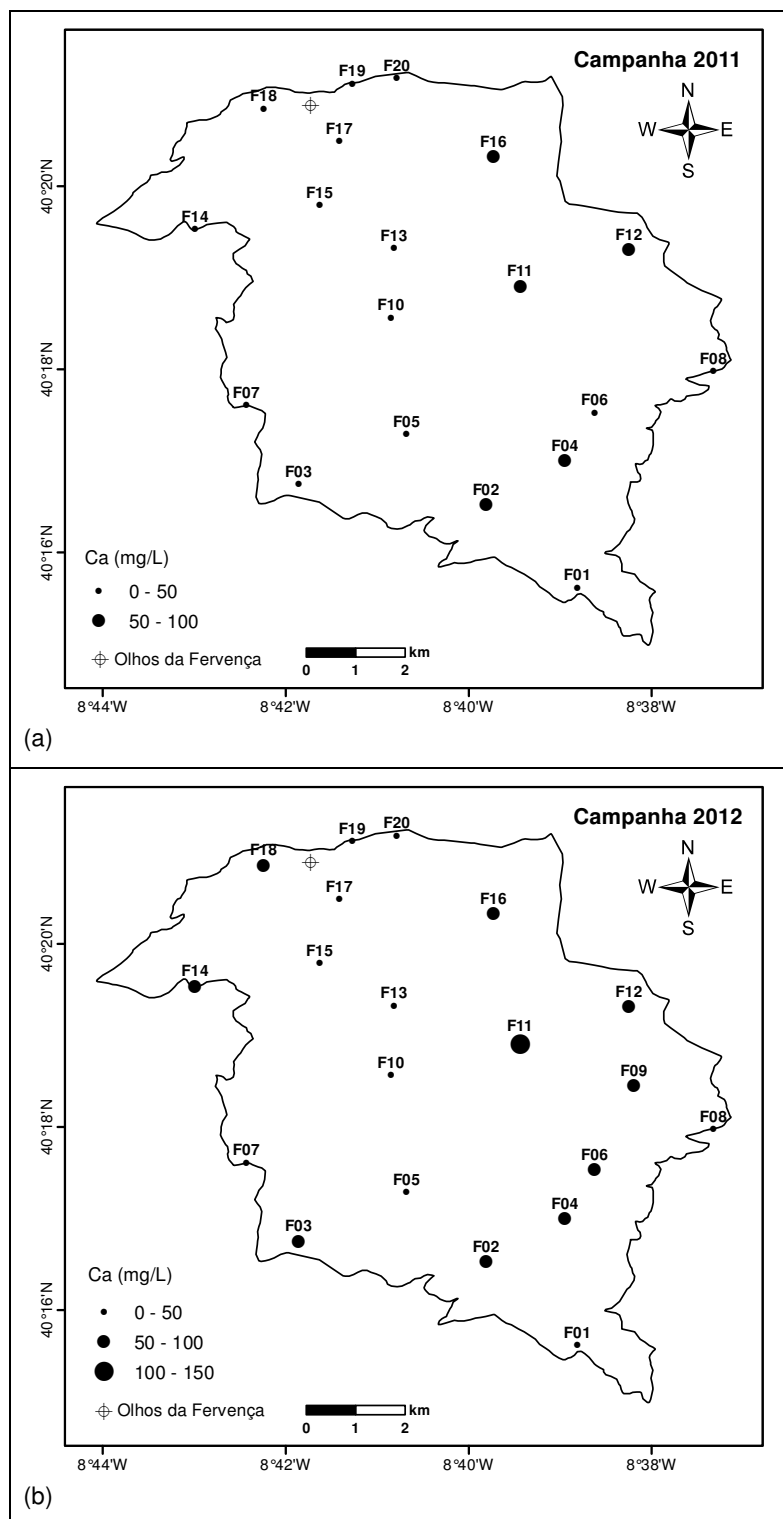


Figura 5.46 - Distribuição espacial do Ca da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

É essencialmente na zona SE da BhF que se obtém os valores mais altos de cálcio, com cerca de 99 mg/L em 2011 e 107 mg/L em 2012 sempre em F11, em sintonia com a geologia predominantemente calcária e com o sentido preferencial de circulação subterrânea (cartas piezométricas em 4.3.2).

5.2.2.14 - Sódio

Nas águas subterrâneas o sódio ocorre preferencialmente na forma de cloretos e a sua origem está relacionada com alteração de feldspatos, dissolução de sulfatos e de sal-gema, intrusão marinha e contaminação urbana e industrial (Custodio & Llamas, 1983). É um catião muito solúvel e responsável pela salinidade. Em águas subterrâneas as concentrações variam entre 0.1 e 100 mg/L (Feitosa & Filho, 2000), mas geralmente são superiores a 5 mg/L (Clesceri *et al.*, 1998); em águas doces podem chegar a 150 mg/L (Custodio & Llamas, 1983).

A Tabela 5.22 resume a estatística do ião e a Figura 5.47 e a Figura 5.48 a projeção espacial.

Tabela 5.22 - Dados estatísticos dos valores de sódio (mg/L) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferverça	Montouro	Ferverça
Média (μ)	15.45	17.48	18.02	19.93
Valor Máximo (MAX)	24.16	31.74	34.70	41.40
Valor Mínimo (MIN)	8.76	6.38	9.24	4.21
Moda (M_o)	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Mediana (P_{50})	14.38	15.08	14.13	17.86
Desvio padrão (σ)	5.43	7.22	8.62	9.41
Percentil P_{10}	9.31	10.82	9.68	12.10
Percentil P_{90}	22.64	28.04	27.45	30.49
Nº de medidas	10	19	10	20

#N/D - não determinável

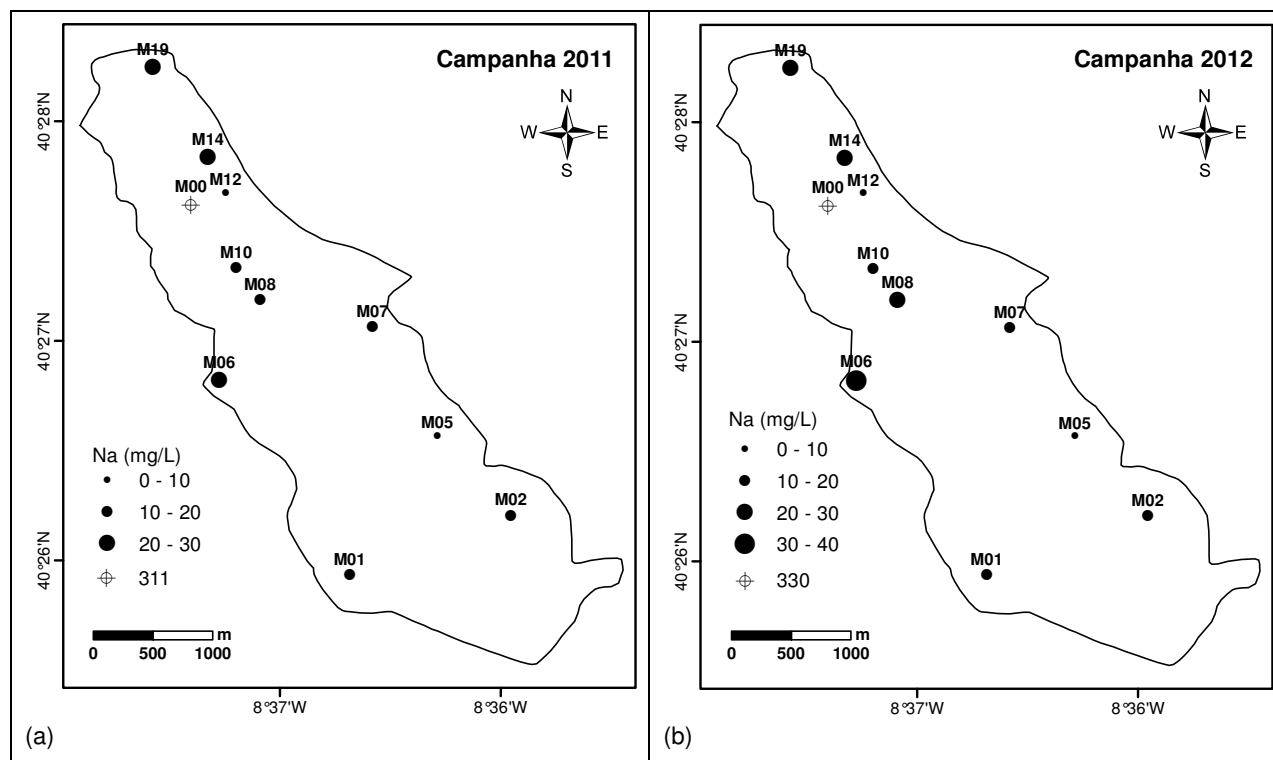


Figura 5.47 - Distribuição espacial do Na da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

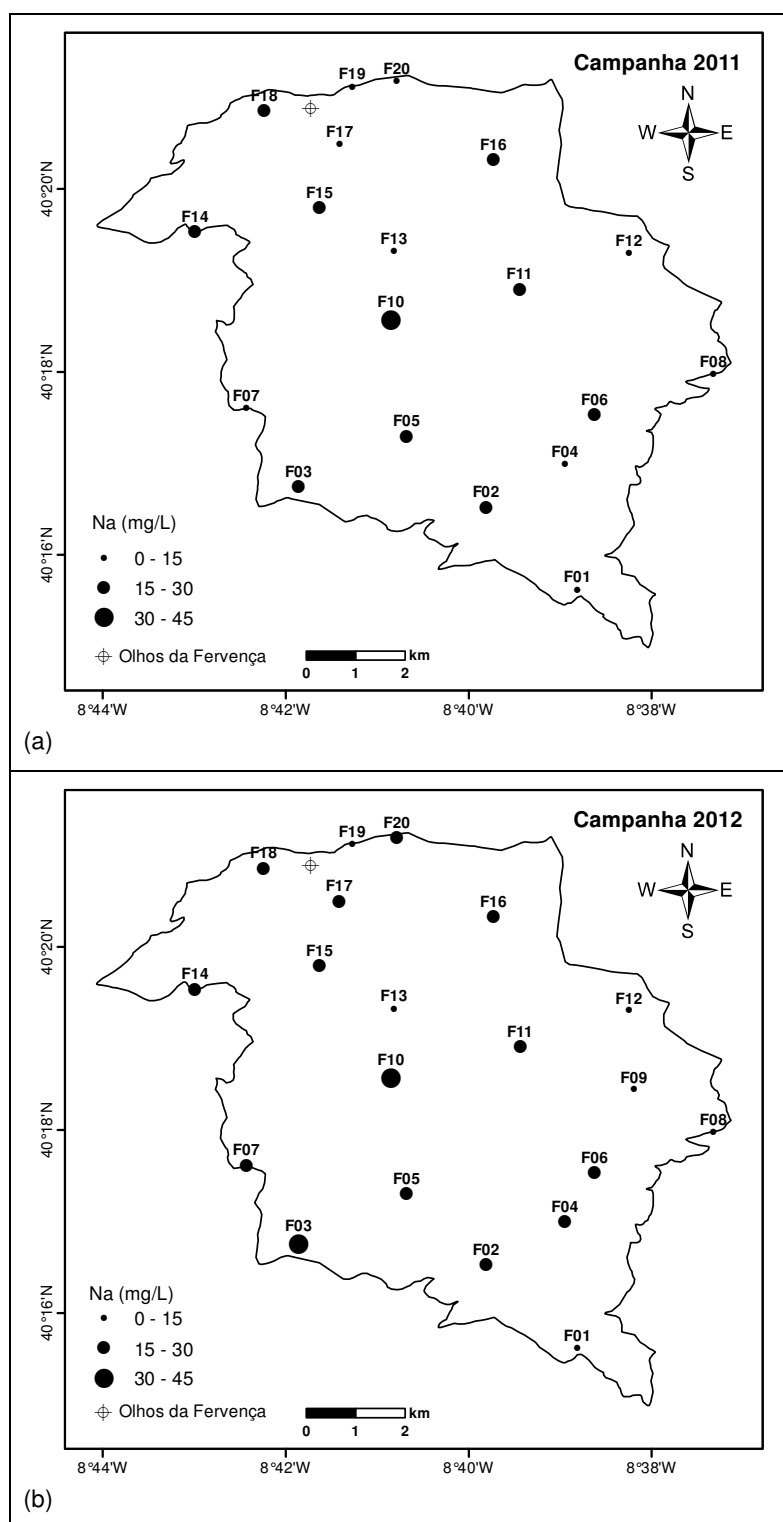


Figura 5.48 - Distribuição espacial do Na da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

As águas analisadas apresentam valores de Na abaixo dos 100 mg/L referidos para as águas subterrâneas, com máximos de 24 e 35 mg/L para a MhM e de 32 e 41 mg/L para a BhF em 2011 e 2012, respetivamente. Entre campanhas deteta-se concentrações semelhantes ou maiores do ião, com exceção para um único ponto de amostragem, F19.

A nascente de Montouro tem valores de sódio muito superiores a todos os outros, respetivamente 311 e 330 mg/L em 2011 e 2012, dando indicações claras da possível origem deste não ser a dissolução de sal-gema.

5.2.2.15 - Magnésio

Normalmente ocorre em minerais de magnesite e dolomite presentes, por exemplo, em dolomias e calcários dolomíticos e em silicatos de magnésio que ao sofrerem dissolução enriquecem as águas neste catião. Pode igualmente estar associado à lixiviação de rochas evaporíticas magnésicas, à mistura com água do mar e à contaminação industrial ou mineira (Custodio & Llamas, 1983). As concentrações mais frequentes de magnésio na água subterrânea variam entre 1 e 40 mg/L; para valores superiores a 100 mg/L faz pensar em influência do mar (Pulido Carrillo, 1978).

A Figura 5.49 e a Figura 5.50 representam a distribuição espacial do magnésio nas áreas consideradas e a Tabela 5.23 faz a síntese dos dados estatísticos para este catião.

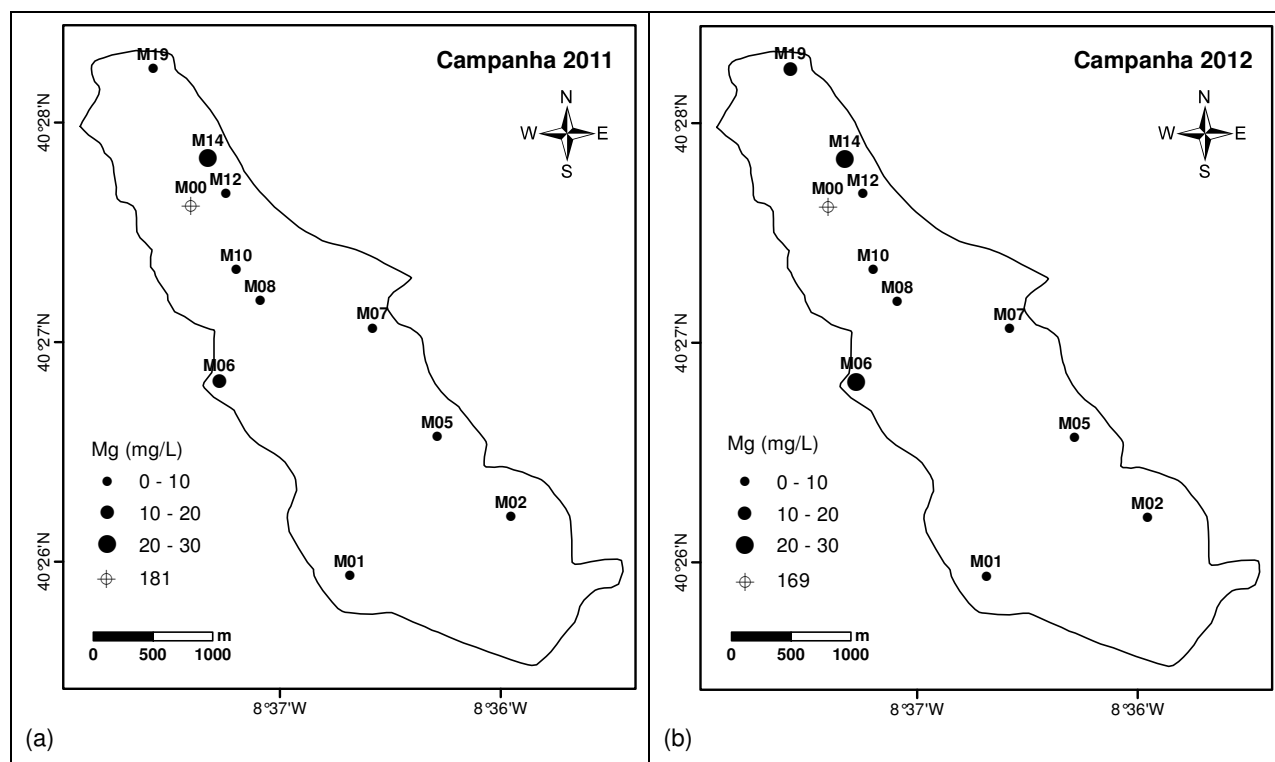


Figura 5.49 - Distribuição espacial do Mg da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

A comparação entre as duas áreas de estudo permite dizer que na BhF os valores são inferiores aos da MhM, no entanto, para ambos os locais temos resultados típicos das águas subterrâneas com concentrações menores que 40 mg/L. Os valores são muito estáveis entre 2011 e 2012, evidenciado pela média em ambas as bacias hidrográficas com 7 mg/L em 2011 e 9 mg/L em 2012, o que revela uma ligeira subida em alguns pontos de água. Os máximos

são de 22 mg/L para ambas as colheitas na MhM e na BhF 17 e 18 mg/L, respetivamente em 2011 e 2012.

No caso da água da nascente de Montouro, os registos acima de 100 mg/L em 2011 e 2012, concretamente de 181 e 169 mg/L, levam a indicar influência do mar, no entanto este facto poderá resultar da ocorrência de trocas iónicas com material argiloso.

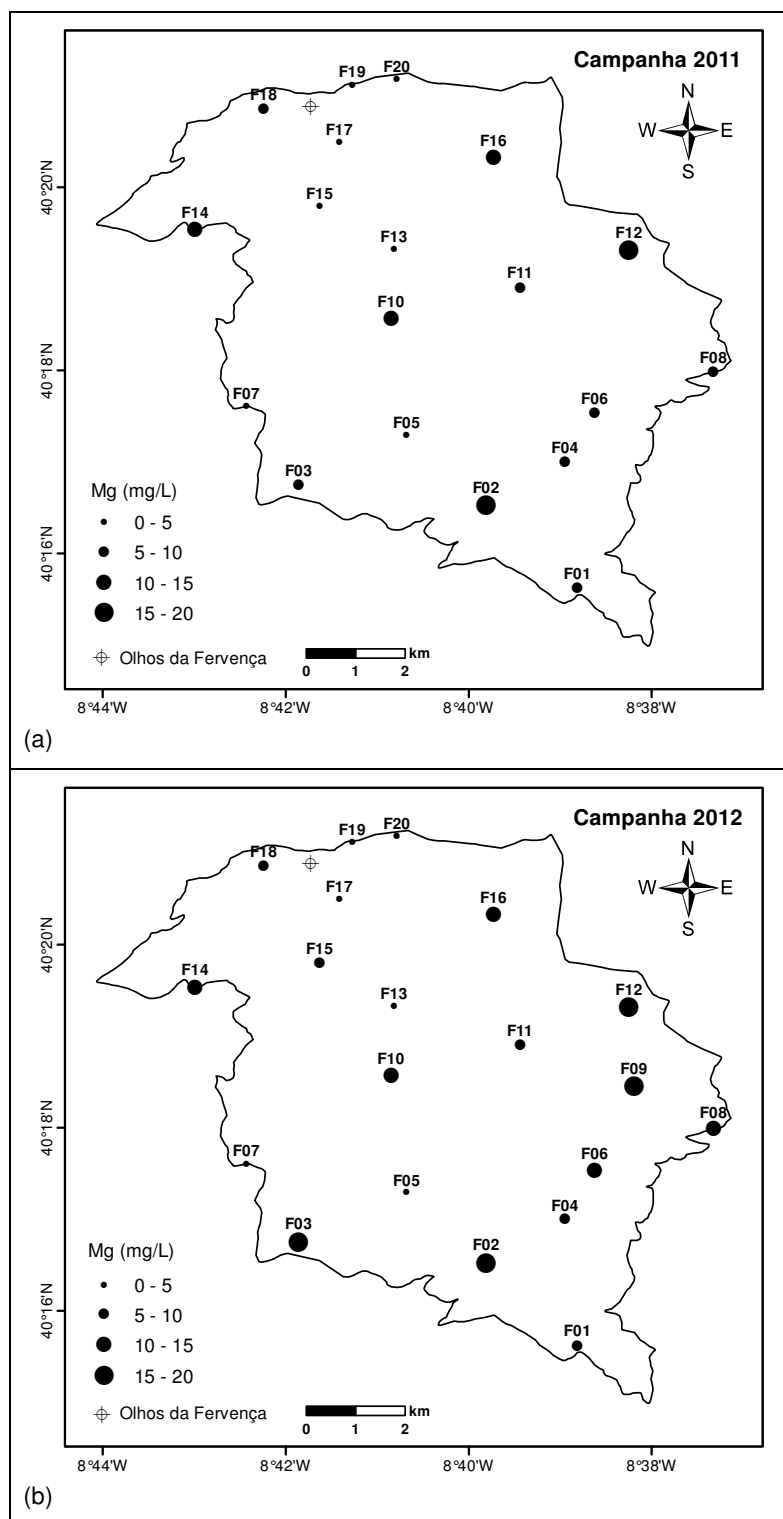


Figura 5.50 - Distribuição espacial do Mg da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

Tabela 5.23 - Dados estatísticos dos valores de magnésio (mg/L) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferveça	Montouro	Ferveça
Média (μ)	7.36	7.36	8.68	8.94
Valor Máximo (MAX)	22.22	17.44	22.10	18.10
Valor Mínimo (MIN)	1.96	1.26	2.18	1.71
Moda (M_o)	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Mediana (P_{50})	4.92	5.70	5.06	7.92
Desvio padrão (σ)	6.12	4.80	7.44	5.29
Percentil P_{10}	3.15	2.69	2.97	2.95
Percentil P_{90}	12.78	14.39	21.56	15.53
Nº de medidas	10	19	10	20

#N/D - não determinável

5.2.2.16 - Potássio

O potássio está associado com minerais alumino-silicatados (por exemplo, micas, argilas) e existe nas águas subterrâneas em pequenas quantidades. É o resultado da dissolução mineral, da decomposição de plantas e de escoamentos agrícolas (Clesceri *et al.*, 1998). Hem (1985) refere que rochas evaporíticas podem localmente incluir leitos de sais de potássio e constituem uma fonte de alta concentração de potássio em salmouras.

Os teores de potássio nas águas subterrâneas são inferiores a 10 mg/L, sendo mais frequentes entre 1 e 5 mg/L (Feitosa & Filho, 2000).

Os parâmetros estatísticos do potássio estão na Tabela 5.24 e o mapeamento dos valores obtidos está na Figura 5.51 e na Figura 5.52.

Tabela 5.24 - Dados estatísticos dos valores de potássio (mg/L) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferveça	Montouro	Ferveça
Média (μ)	5.05	8.89	4.87	7.51
Valor Máximo (MAX)	8.90	31.00	11.76	29.97
Valor Mínimo (MIN)	1.42	0.52	1.24	0.50
Moda (M_o)	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Mediana (P_{50})	4.60	5.60	3.88	3.71
Desvio padrão (σ)	3.21	9.66	3.61	8.04
Percentil P_{10}	1.58	0.77	1.35	0.86
Percentil P_{90}	8.63	21.24	8.53	18.46
Nº de medidas	10	19	10	20

#N/D - não determinável

Na microbacia hidrográfica de Montouro os valores são na quase totalidade inferiores a 10 mg/L e em metade das amostras menores que 5 mg/L, exceto em M06 em 2012 com

12 mg/L com possível relação à contaminação agrícola (fertilizantes), já anteriormente enunciada. Entre colheitas os valores do parâmetro são relativamente constantes, ocorrendo na maioria dos pontos de água uma pequena redução.

No que diz respeito à própria nascente, o potássio em 2011 e 2012 é de 43 e 31 mg/L, respetivamente, valores significativamente maiores que os das redondezas, no entanto, possíveis de explicar se tivermos em conta que uma das argilas presente na zona de contacto onde existe a ascensão desta água é a ilite (como apresentado em 2.7).

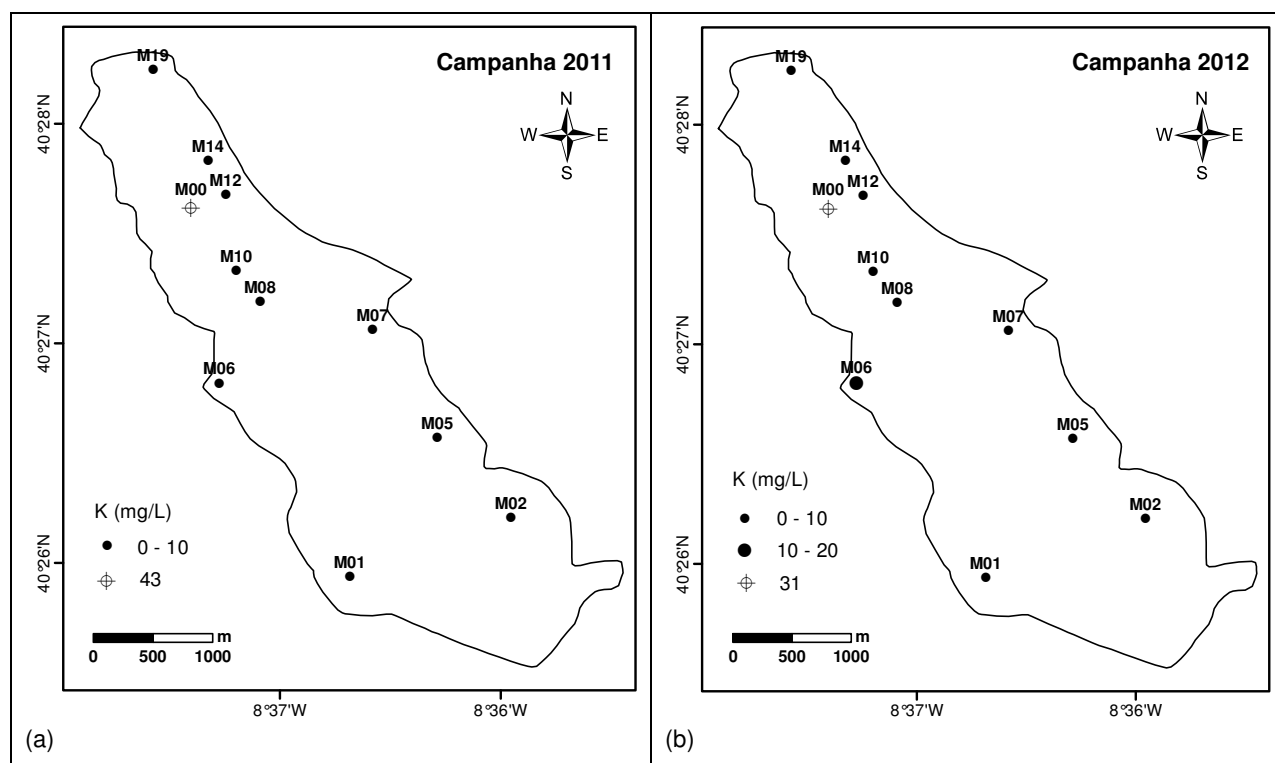


Figura 5.51 - Distribuição espacial do K da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

Na zona da bacia hidrográfica de Ferverença há um predomínio de amostras situadas no intervalo até 10 mg/L, no entanto, sete dos pontos de água têm valores superiores chegando a alcançar máximos de 31 e 30 mg/L em 2011 e 2012, respetivamente, e sempre em F03. Estas concentrações, com ordem de grandeza semelhante em F10, poderão estar diretamente relacionadas com as práticas agrícolas existentes no local.

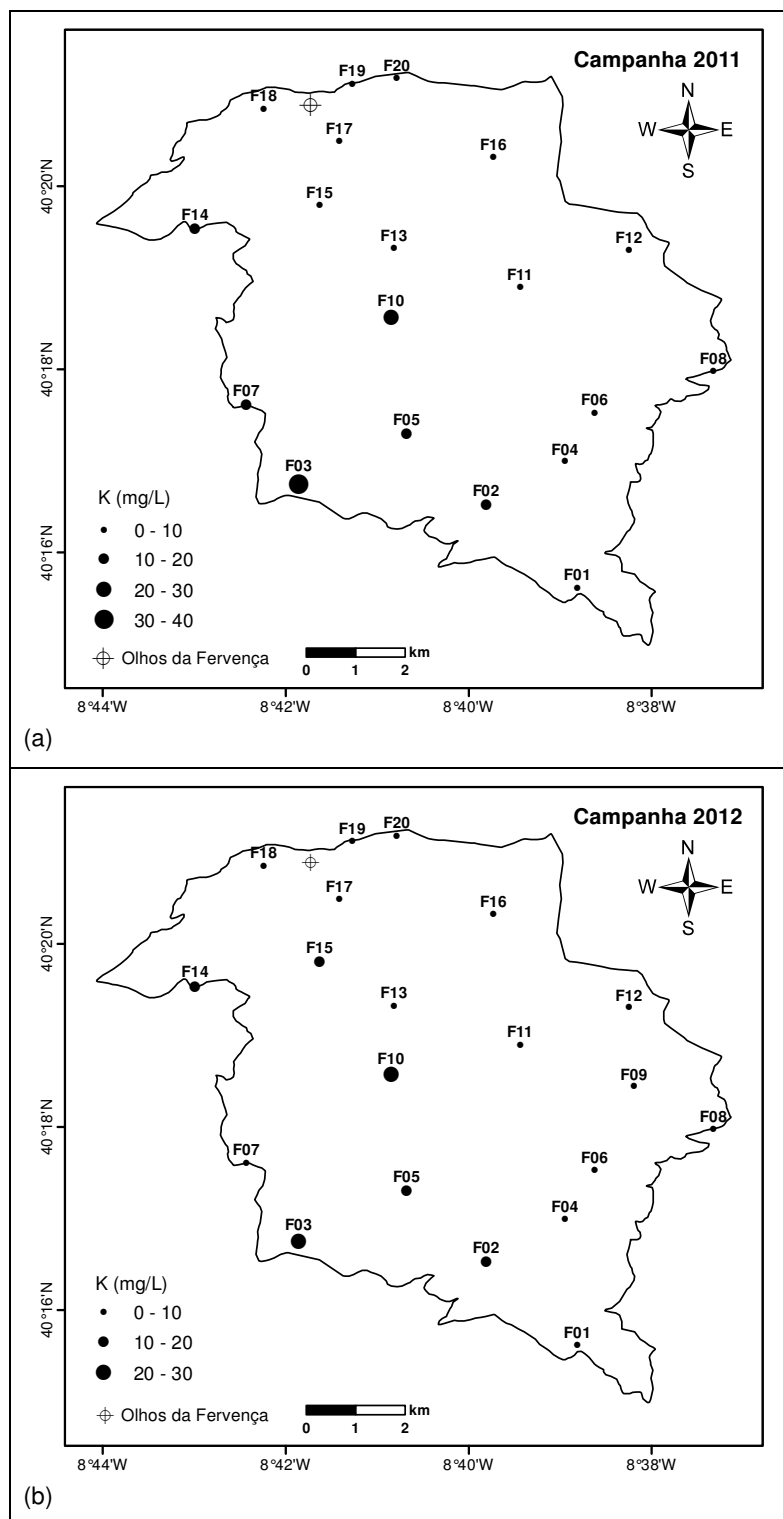


Figura 5.52 - Distribuição espacial do K da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

5.2.2.17 - Alumínio

Normalmente, o alumínio aparece combinado com silício e oxigénio formando feldspatos, micas e minerais argilosos; a sua presença em águas naturais sob a forma de Al^{3+} apenas se verifica para valores de pH inferiores a 4 (Clesceri *et al.*, 1998). Hem (1985) refere a gibsite, um hidróxido de alumínio quase puro, como um mineral bastante comum e fonte deste catião.

O alumínio raramente ocorre em solução em águas naturais em concentrações superiores a alguns décimos ou centésimos de mg/L, com exceção principalmente nas águas com pH muito baixo (Hem, 1985). As águas têm teores na ordem de 0.005 e 0.3 mg/L, podendo excepcionalmente chegar a 100 mg/L em águas muito ácidas (Custodio & Llamas, 1983).

A Tabela 5.25 tem a compilação dos resultados da estatística do alumínio e na Figura 5.53 e na Figura 5.54 está patente a distribuição espacial do elemento.

Tabela 5.25 - Dados estatísticos dos valores de alumínio (mg/L) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferveça	Montouro	Ferveça
Média (μ)	0.68	0.27	0.08	0.18
Valor Máximo (MAX)	2.28	1.29	0.18	1.04
Valor Mínimo (MIN)	0.05	0.05	0.03	0.04
Moda (M_0)	#N/D	0.17	#N/D	#N/D
Mediana (P_{50})	0.65	0.19	0.07	0.09
Desvio padrão (σ)	0.65	0.29	0.05	0.26
Percentil P_{10}	0.15	0.08	0.04	0.06
Percentil P_{90}	1.10	0.56	0.14	0.28
Nº de medidas	10	19	10	20

#N/D - não determinável

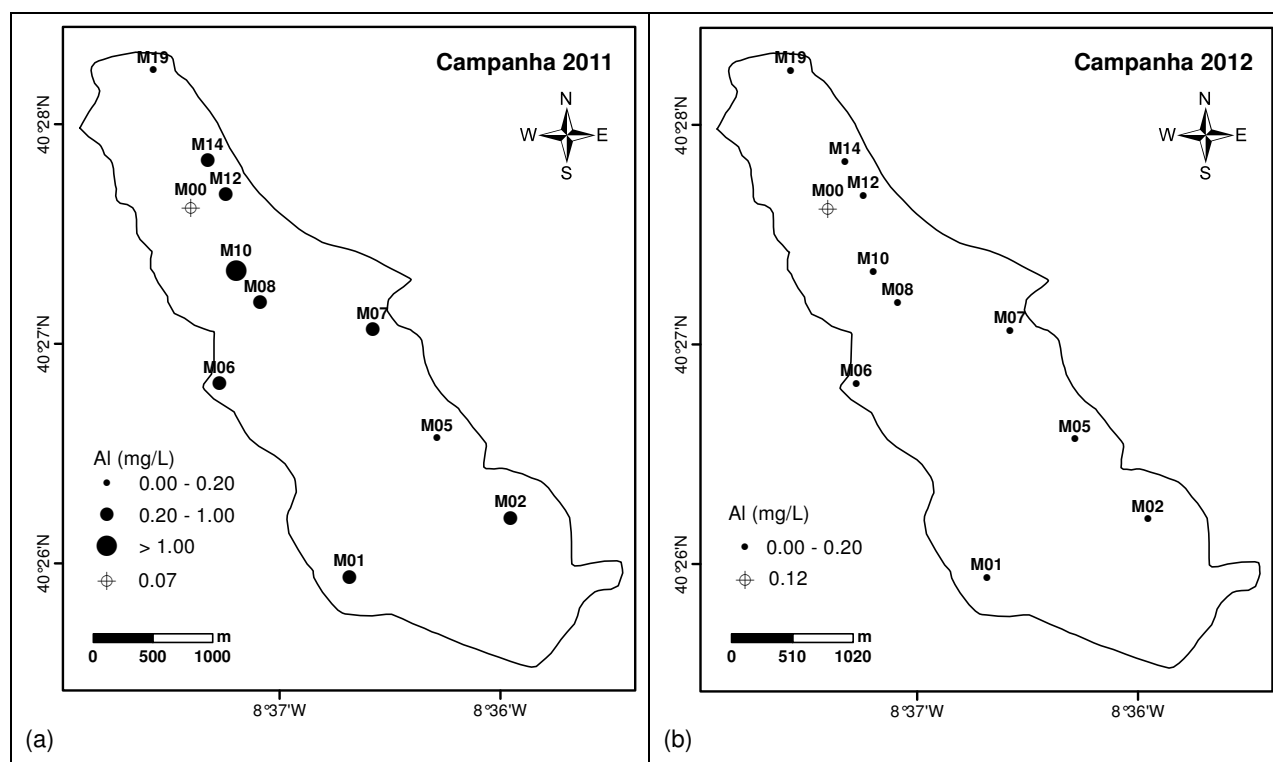


Figura 5.53 - Distribuição espacial do Al da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

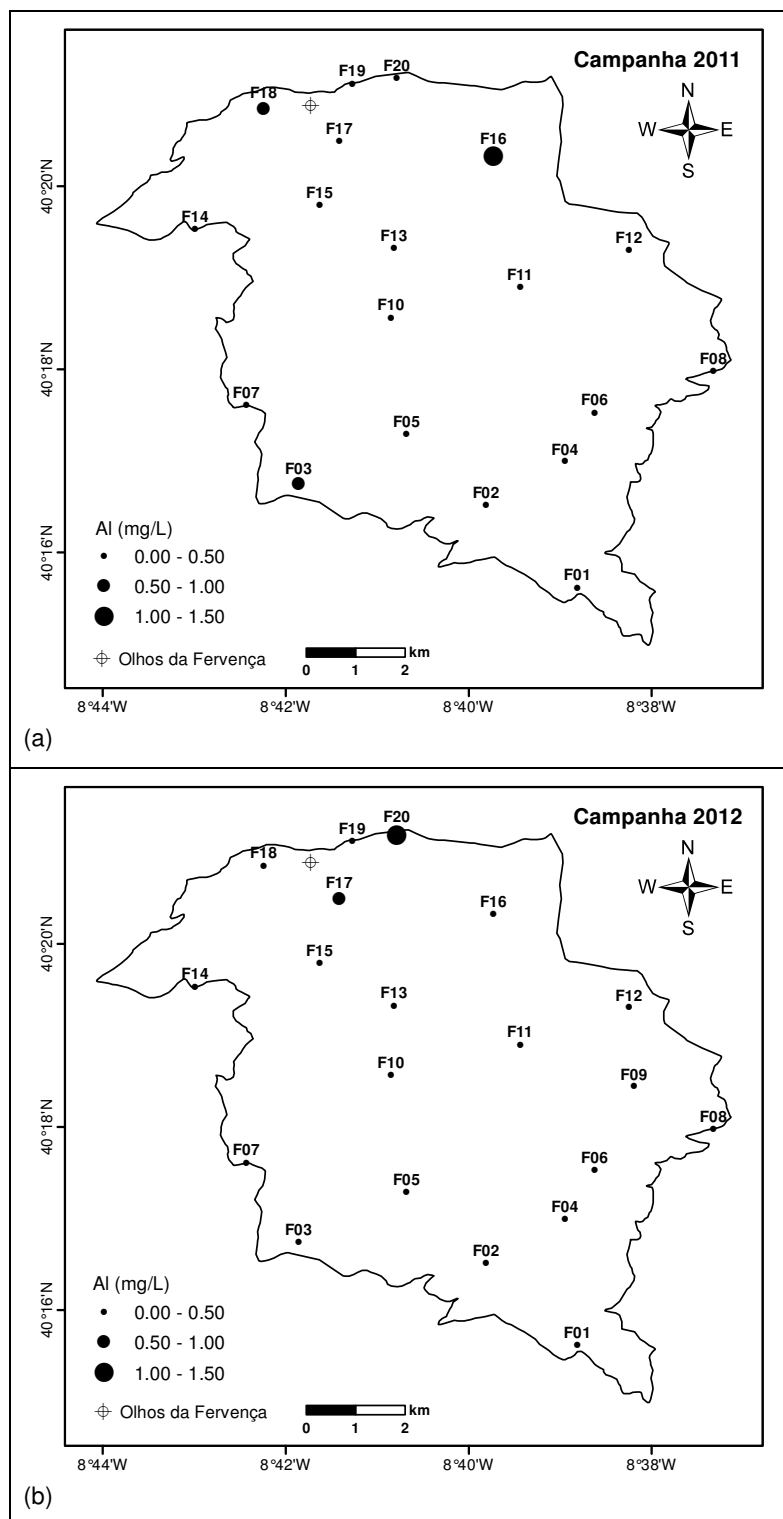


Figura 5.54 - Distribuição espacial do Al da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

Na MhM verifica-se uma redução considerável deste ião na colheita de 2012, com exceção de M19, que subiu ligeiramente a concentração, no entanto, todos os pontos de amostragem têm registos inferiores a 0.2 mg/L e perfeitamente comuns. Na colheita de 2011 grande parte dos resultados está entre 0.2 e 1.0 mg/L, mas M10 chega a obter um máximo de 2.3 mg/L. O pH mínimo de 6.2 (Figura 5.23 (a)) possivelmente favoreceu esta concentração de Al, mas que se revelou variável no tempo, com o teor a baixar para os 0.1 mg/L em 2012.

A nascente de Montouro tem valores de alumínio de 0.07 mg/L em 2011 e 0.12 mg/L em 2012, refletindo um aumento do parâmetro na segunda colheita, no entanto, com resultados muito inferiores a 0.3 mg/L.

Na BhF, também se registou a diminuição dos teores de alumínio em 2012 (exceção para cinco amostras), com o máximo de 1.3 mg/L de 2011 em F16 a baixar para 1.0 mg/L em 2012 em F20. Em ambas as colheitas a maioria dos pontos de amostragem evidencia valores abaixo de 0.3 mg/L (quinze em 2011 e dezassete em 2012) e constata-se que os teores mais altos não são detetados nas mesmas amostras nas duas campanhas, o que poderá indiciar uma influência pontual mas espacialmente e temporalmente variável.

5.2.2.18 - Ferro

Normalmente, a solubilidade do ião ferroso (Fe^{2+}) é controlada pela concentração de carbonatos; como a água subterrânea é muitas vezes anóxica, qualquer ferro solúvel está geralmente no estado ferroso (Clesceri *et al.*, 1998). Ao ser exposto ao ar ou pela adição de oxidantes, o ferro ferroso é oxidado para o estado férrico (Fe^{3+}) e apenas para pequenos valores de pH o ferro férrico está solúvel na água. Custodio & Llamas (1983) indicam como algumas das fontes de origem do ferro nas águas a dissolução de minerais silicatados, sulfuretos e óxidos de ferro, o ataque à maioria das rochas sedimentares e ao entubamento de poços/furos.

As concentrações de ferro presentes na água são geralmente pequenas (Hem, 1985). Nas águas subterrâneas o Fe^{2+} tem teores entre 0 e 10 mg/L, sendo de menos de 0.5 mg/L em águas arejadas e quando o pH está compreendido entre 5 e 8 poderá alcançar os 50 mg/L (Custodio & Llamas, 1983). Clesceri *et al.* (1998) referem concentrações de 0.1 a 10 mg/L nas águas subterrâneas.

A análise estatística obtida para o ferro está contida na Tabela 5.26 e o mapeamento das medidas do elemento representadas na Figura 5.55 e na Figura 5.56.

Tabela 5.26 - Dados estatísticos dos valores de ferro (mg/L) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferveça	Montouro	Ferveça
Média (μ)	0.05	0.05	0.07	0.06
Valor Máximo (MAX)	0.18	0.14	0.14	0.13
Valor Mínimo (MIN)	0.01	0.00	0.01	0.01
Moda (M_o)	#N/D	0.00	#N/D	#N/D
Mediana (P_{50})	0.03	0.03	0.07	0.06
Desvio padrão (σ)	0.05	0.05	0.04	0.03
Percentil P_{10}	0.01	0.00	0.03	0.03
Percentil P_{90}	0.07	0.13	0.11	0.12
Nº de medidas	10	19	10	20

#N/D - não determinável

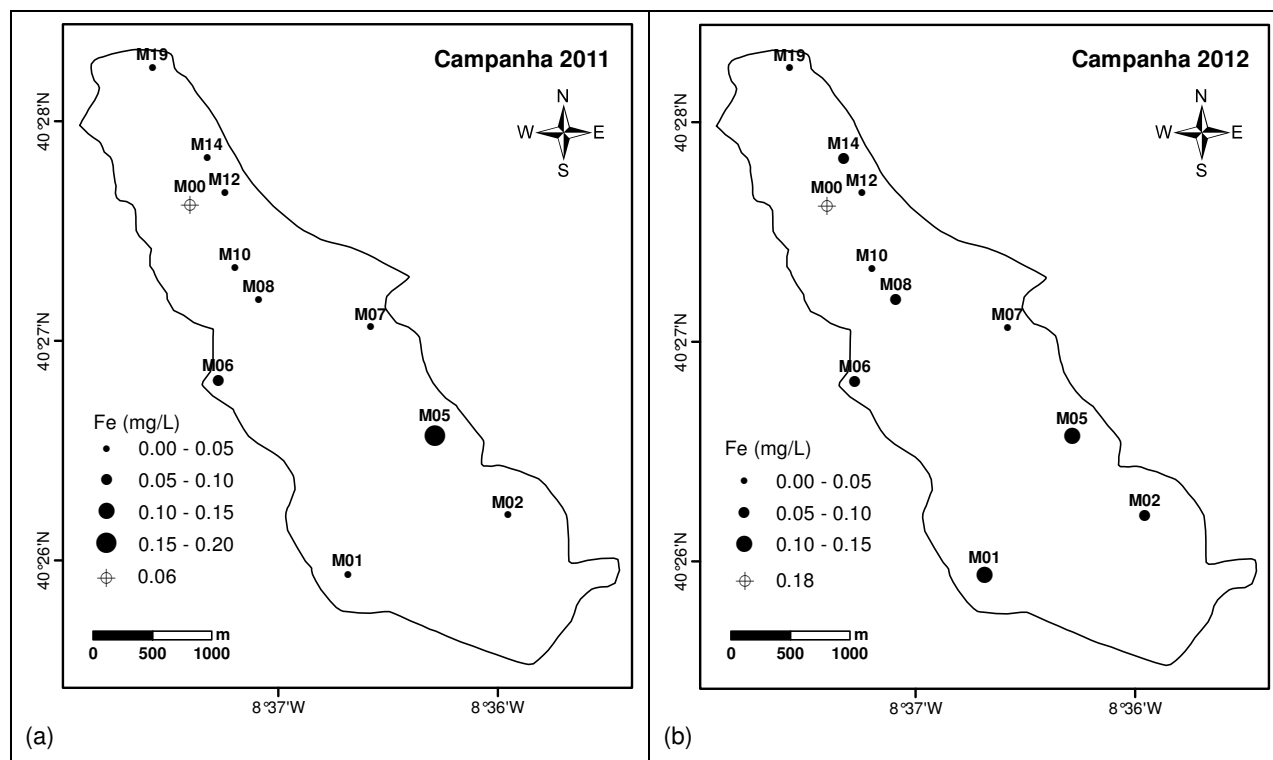


Figura 5.55 - Distribuição espacial do Fe da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

Todos os teores de ferro estão dentro dos intervalos referidos para este tipo de águas. Os valores têm máximos de 0.18 mg/L em 2011 e 0.14 mg/L em 2012, na microbacia hidrográfica de Montouro, enquanto na BhF os máximos são de 0.14 e 0.13 mg/L em 2011 e 2012, respetivamente. No entanto, verifica-se que a média sobe entre a primeira e a segunda colheita em ambos os locais, de 0.05 para 0.07 mg/L na zona de Montouro e de 0.05 para 0.06 mg/L na zona de Ferverça, consequência das ligeiras subidas de concentração na maioria das amostras.

Alguns dos pontos de amostragem, oito na BhF e três na MhM, evidenciam uma relação inversa com o Eh, ou seja, os valores mais elevados de ferro correspondem a Eh mais baixos como também se verifica no trabalho de Andrade (2004).

A nascente de Montouro apresenta um acréscimo deste parâmetro entre as duas campanhas, passando de 0.06 mg/L em 2011 para 0.18 mg/L em 2012, no entanto, tratam-se de valores da mesma ordem de grandeza dos restantes pontos de água amostrados na região. Esta variação entre campanhas reflete a mesma relação com Eh identificada noutras águas, uma vez que em 2011 o Eh é de 238 mV e em 2012 é de 106 mV.

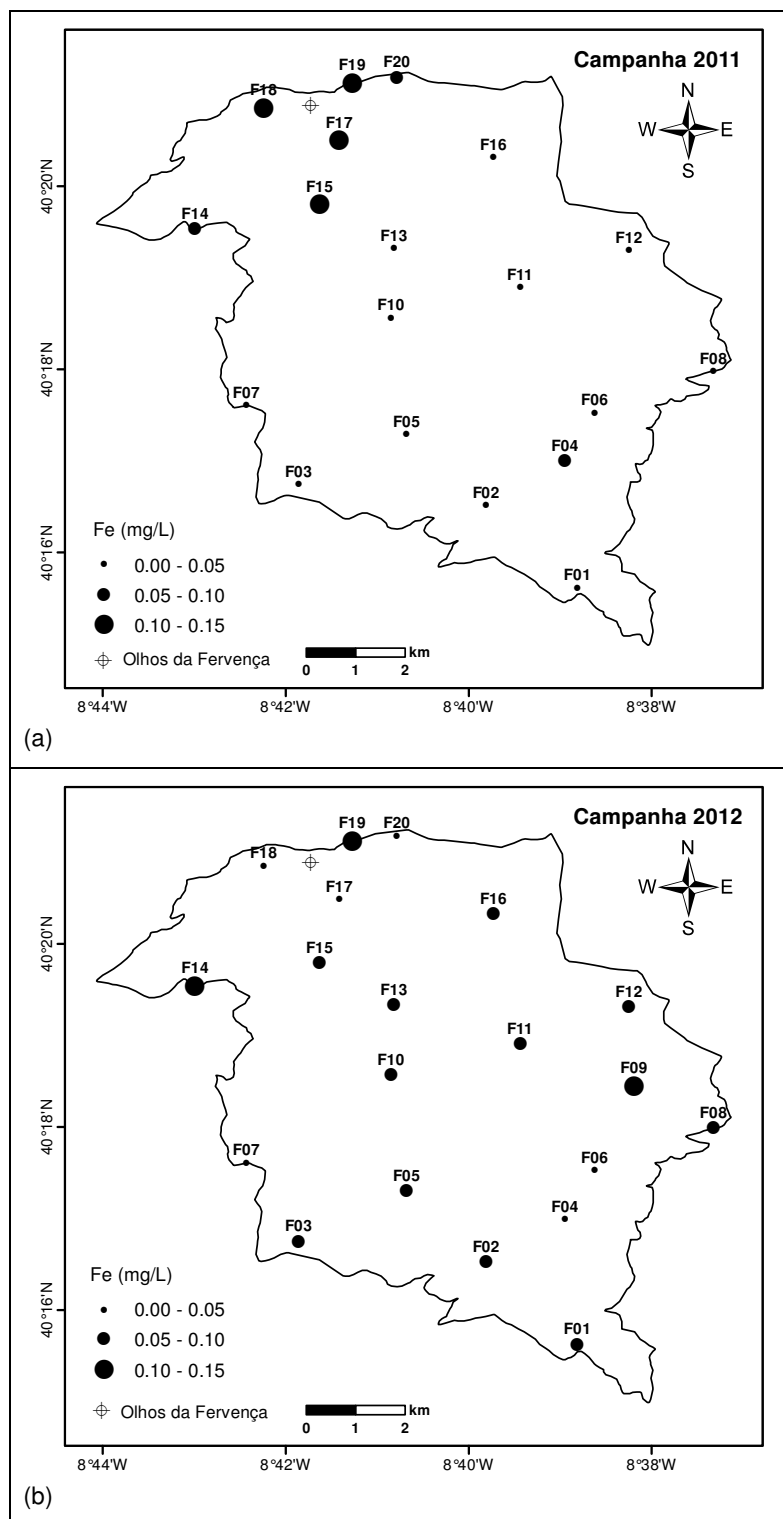


Figura 5.56 - Distribuição espacial do Fe da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

5.2.2.19 - Manganês

O manganês tem um comportamento semelhante ao ferro (Custodio & Llamas, 1983). Aparece no estado reduzido Mn^{2+} , no entanto, oxida-se facilmente e não é estável na presença do ar (Feitosa & Filho, 2000). Segundo Reimann & Caritat (1998) as fontes de manganês no ambiente são devidas a alteração de rochas (contendo, por exemplo, pirolusite ou rodocrosite),

poeiras transportadas pelo vento, agricultura (fertilizantes), circulação de veículos (agente substituto do chumbo no combustível), indústrias de mineração e fundição e indústria de produção de aço, no entanto, as fontes geológicas geralmente são mais importantes que as antropogénicas. As concentrações são abaixo de 0.2 mg/L e raras vezes acima de 1 mg/L, sendo mais abundante em águas ácidas (Custodio & Llamas, 1983).

A Tabela 5.27 apresenta o resumo dos dados estatísticos do manganês e a distribuição espacial do ião está representada na Figura 5.57 e na Figura 5.58.

Tabela 5.27 - Dados estatísticos dos valores de manganês (mg/L) dos pontos amostrados.

Parâmetro estatístico	Campanha de 2011		Campanha de 2012	
	Montouro	Ferverença	Montouro	Ferverença
Média (μ)	0.05	0.02	0.06	0.02
Valor Máximo (MAX)	0.14	0.05	0.10	0.05
Valor Mínimo (MIN)	0.02	0.00	0.02	0.00
Moda (M_o)	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Mediana (P_{50})	0.04	0.02	0.06	0.01
Desvio padrão (σ)	0.04	0.01	0.02	0.01
Percentil P_{10}	0.02	0.01	0.04	0.01
Percentil P_{90}	0.11	0.04	0.09	0.04
Nº de medidas	10	19	10	20

#N/D - não determinável

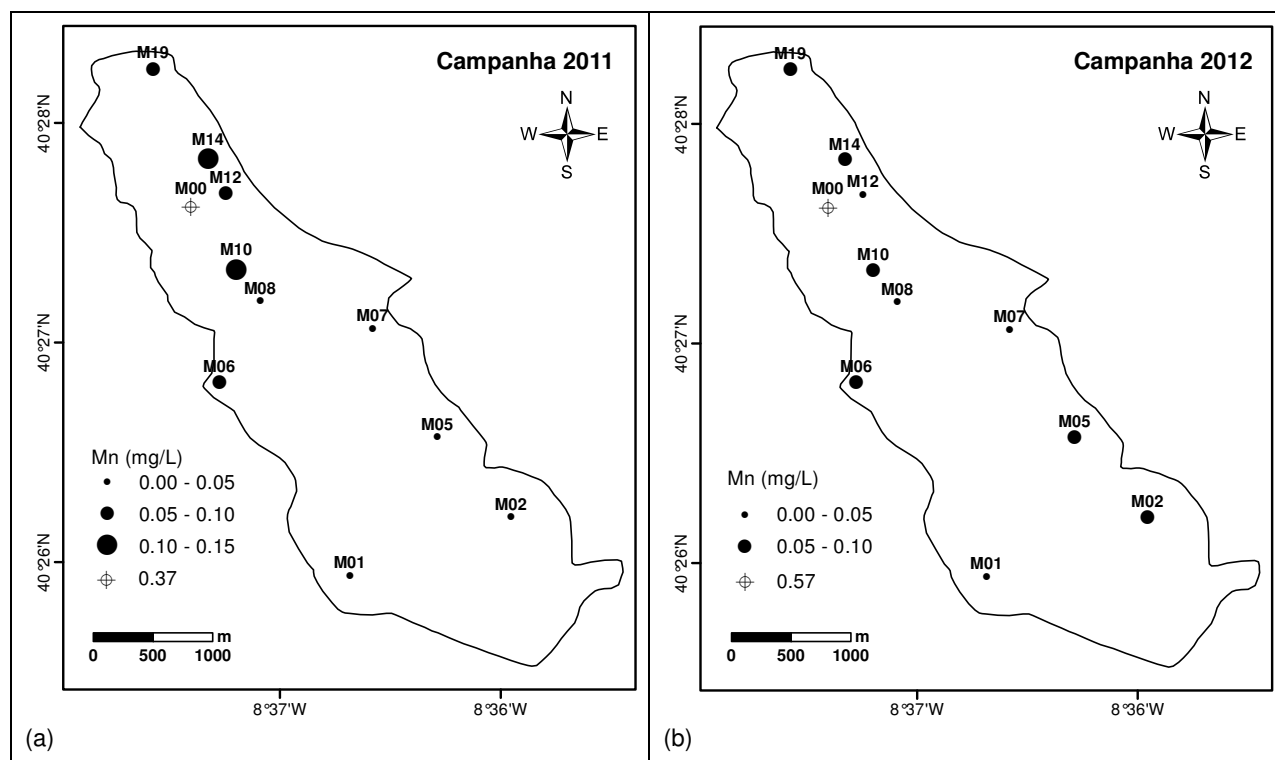


Figura 5.57 - Distribuição espacial do Mn da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

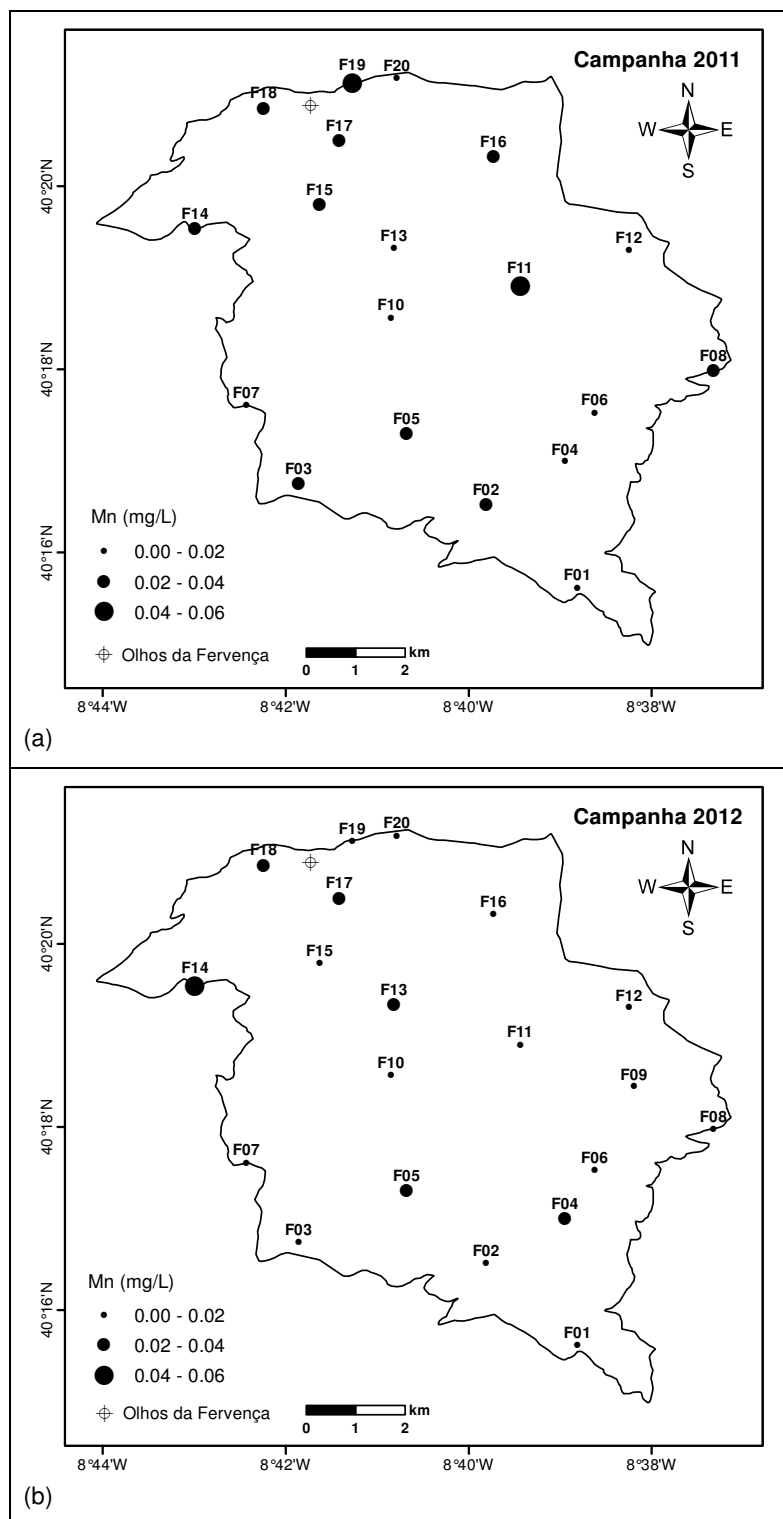


Figura 5.58 - Distribuição espacial do Mn da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

Em ambos os locais de estudo as águas têm valores de Mn abaixo de 0.2 mg/L, com 0.14 e 0.10 mg/L de máximo na MhM, respetivamente em 2011 e 2012, e na BhF o máximo é de 0.05 mg/L para ambos os anos. Verifica-se que os valores são relativamente semelhantes entre colheitas, com pequenas variações em algumas amostras (caso, por exemplo, de M10, M14, F11, F14 e F19).

A água da nascente de Montouro revela um comportamento diferente das restantes águas, com teores de Mn de 0.37 e 0.57 mg/L em 2011 e 2012, respetivamente. Estas concentrações sendo superiores a 0.2 mg/L estão contudo abaixo de 1 mg/L e evidenciam uma subida entre campanhas seguindo a mesma tendência que o ião ferro.

5.2.2.20 - Amónia

A amónia é oxidada com facilidade a azoto, nitrito ou nitrato e é facilmente retida no terreno por troca de bases. As concentrações, em geral, são menores que 0.1 mg/L, mas em casos muito excecionais pode chegar a 400 mg/L (Custodio & Llamas, 1983).

As determinações realizadas não detetaram a presença deste elemento nas águas em estudo.

5.2.3 - Resultados da campanha de 2013

Os resultados obtidos para os elementos físico-químicos determinados na campanha de 2013, em cada uma das áreas de estudo, estão sintetizados na Tabela 5.28 e na Tabela 5.29.

Nesta campanha foram amostradas as duas nascentes em estudo, Montouro (M00) e Olhos da Ferverença (F00), e dois poços, M14 e F16, um de cada bacia hidrográfica e selecionados devido à frequente utilização dos mesmos, que chega a ser diária.

Tabela 5.28 - Resultados dos parâmetros de campo dos pontos amostrados.

Pontos de água	pH	OD (mg/l)	SEC (µS/cm)	Turb (NTU)	T (°C)	Sal (%)	E _{meas} (mV)	Eh (mV)	HCO ₃ (mg/L)
M00	7.29	10.59	4680.00	21.60	17.03	2.40	-100.00	112.60	630.98
M14	8.19	18.61	657.00	5.70	23.60	0.30	61.00	207.98	189.48
F00	7.43	12.75	509.00	1.03	17.00	0.20	173.00	385.60	197.65
F16	7.72	19.79	624.00	5.90	20.40	0.30	121.00	210.22	213.98

OD - Oxigénio dissolvido; SEC - Condutividade eléctrica específica; Turb - Turbidez;

T - Temperatura; Sal - Salinidade

Tabela 5.29 - Resultados dos parâmetros de laboratório dos pontos amostrados.

Pontos de água	Cl (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	PO ₄ (µg/L)	Ca (mg/L)	Na (mg/L)	Mg (mg/L)	K (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Al (mg/L)	NH ₄ (mg/L)
M00	1189.63	3.64	145.95	5.41	327.25	412.96	267.85	36.07	0.10	0.48	0.06	< LD
M14	26.99	30.52	102.25	4.51	63.46	19.71	25.42	10.20	0.17	0.01	0.13	< LD
F00	25.49	6.85	60.59	3.61	59.36	16.15	13.38	2.22	0.11	0.07	0.20	< LD
F16	38.99	42.76	45.28	0.90	74.67	29.48	13.11	8.83	0.15	0.01	0.08	< LD

LD - Limite de deteção do método analítico

A análise dos resultados apresentados permite de uma forma geral dizer que os valores obtidos são da mesma ordem de grandeza dos registados em cada ponto de água (M00, M14 e F16) nas campanhas de 2011 e 2012. No entanto, é possível fazer referência aos seguintes

aspectos: em M14 ocorre uma redução dos íons de Cl, Ca e Na, com ligeiro acréscimo de NO_3 e SO_4 ; em F16 decréscimo de Cl, NO_3 , SO_4 e Ca; em M00 temos uma subida de HCO_3 , Cl, Ca, Na e Mg em alguns casos significativa.

No âmbito deste estudo, foi nesta campanha de 2013 que se reuniram condições para proceder à amostragem da água da exurgência Olhos da Ferverça e conseqüentemente a realização da respetiva análise química. As concentrações dos elementos químicos na água da exurgência são de valores próximos de outras águas da BhF, especialmente na zona SE, sendo de salientar que todos os parâmetros apresentam valores dentro dos intervalos anteriormente referidos para as águas subterrâneas, não existindo indícios de contaminação. O bicarbonato é o anião predominante acompanhado pelo cálcio como catião de maior concentração evidenciando a circulação desta água através de carbonatos. A condutividade elétrica específica ($509 \mu\text{S}/\text{cm}$) tem um valor com boa correspondência com os somatórios dos catiões e aniões principais uma vez que se situa no intervalo referido por Clesceri *et al.* (1998).

5.3 - Fácies hidroquímica

A representação dos resultados das análises químicas em diagramas permite obter a fácies hidroquímica das águas em estudo e constitui uma síntese da sua composição e da sua evolução química. Projetaram-se os valores no diagrama de Piper, com as concentrações expressas em %meq/L.

A classificação atribuída às amostras teve em consideração a interpretação do diagrama, mas também a sequência iónica (em meq/L) dos elementos químicos principais, HCO_3 , Cl, SO_4 e NO_3 nos aniões e Ca, Na, Mg e K nos catiões, com o objetivo de alcançar uma fácies hidroquímica mais ajustada (Morais, 2012).

5.3.1 - Microbacia hidrográfica de Montouro

Os diagramas de Piper para as amostras da MhM da campanha de 2011 estão representados na Figura 5.59 e para a campanha de 2012 na Figura 5.60. Optou-se por projetar em simultâneo os resultados da nascente M00, para possibilitar uma melhor comparação entre as águas em estudo.

A classificação obtida em ambas as campanhas para as amostras da microbacia hidrográfica, excetuando a nascente de Montouro, está sintetizada na Figura 5.61 e a respetiva distribuição espacial representada sobre o mapa geológico na Figura 5.62, possibilitando correlacionar a fácies hidroquímica da água com a geologia aflorante e a verificação de domínio de amostragem em formações quaternárias face às cretácias.

Como se pode observar há uma pequena variação na classificação entre as duas amostragens, que resulta das flutuações de alguns íons, preferencialmente do sulfato, bicarbonato e cloreto (como referido anteriormente). Exemplo disto são as amostras M02 e M14 que estavam próximas do limite de separação de fácies e com o aumento de HCO_3 face a SO_4 alterou a classificação destas águas de sulfatada cálcica, bicarbonatada em 2011 para bicarbonatada cálcica em 2012. M06 também passou de sulfatada, cloretada cálcica em 2011 a cloretada cálcica, bicarbonatada em 2012.

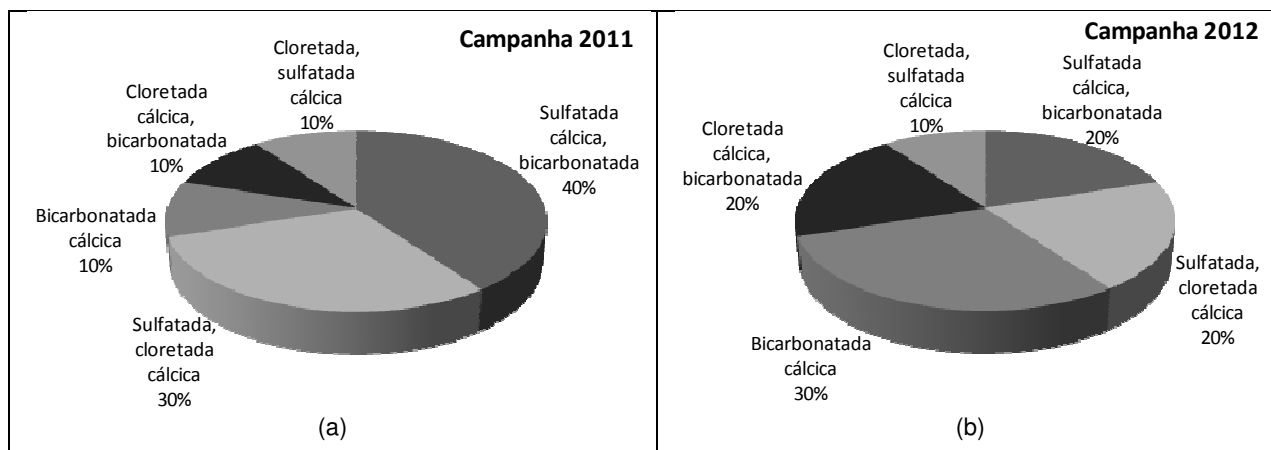


Figura 5.61 - Resumo da classificação das amostras da MhM em 2011 (a) e 2012 (b).

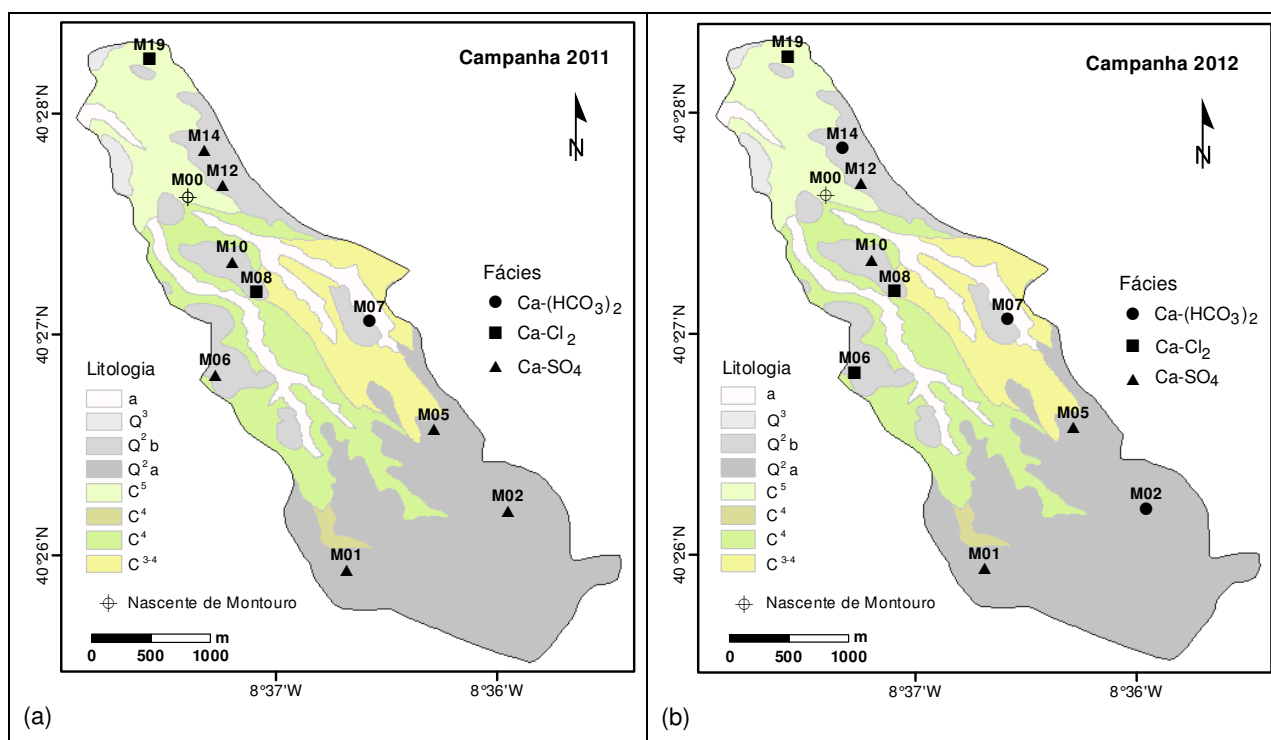


Figura 5.62 - Distribuição espacial da fácies hidroquímica da água na MhM em 2011 (a) e 2012 (b), representada sobre mapa geológico.

A projeção em diagrama Piper (Figura 5.63) dos resultados da análise química de M14 da campanha de 2013, em conjunto com os das campanhas anteriores, permite-nos confirmar a classificação desta água como bicarbonatada cálcica (semelhante a 2012) e observar a evolução hidroquímica da mesma desde a primeira amostragem em 2011 até 2013, constatando-se que apesar das oscilações dos elementos químicos está patente uma identidade química.

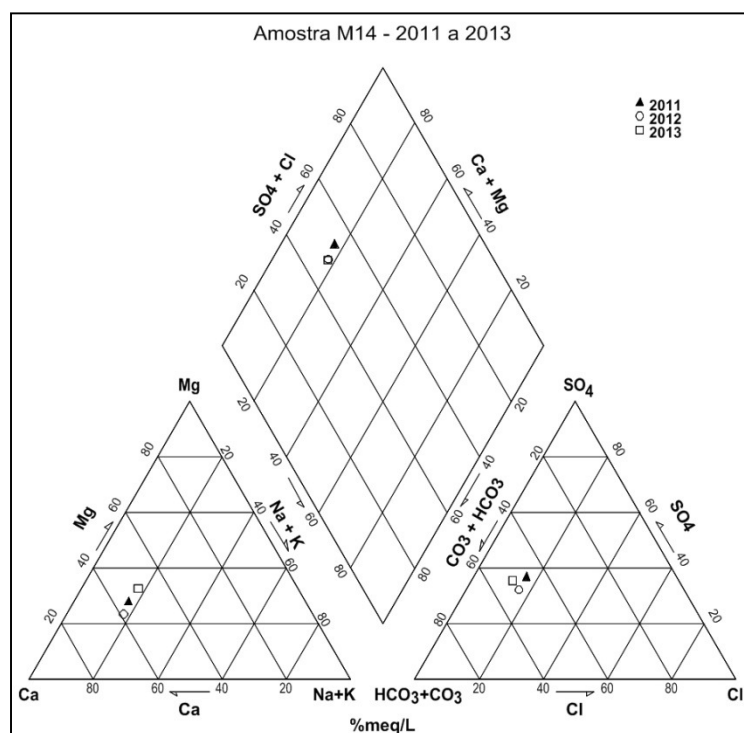


Figura 5.63 - Diagrama Piper das amostras de M14 de 2011 a 2013.

5.3.1.1 - Evolução hidroquímica da nascente de Montouro

A Tabela 5.30 tem uma compilação dos valores dos parâmetros físico-químicos da água da nascente de Montouro resultantes de determinações realizadas em 1906 por Charles Lepierre e publicados em Acciaiuoli (1952), em 2006 por Universidade de Aveiro e gentilmente cedidos por Clara Sena (dados não publicados) e em 2011, 2012 e 2013 no âmbito das campanhas realizadas durante este trabalho. Na Figura 5.64 está a representação em diagrama Piper.

Os resultados de Charles Lepierre mostram concentrações muito superiores em Cl, Ca, Na e Mg em relação aos outros dados, o que se reflete num distanciamento da representação deste ano no diagrama comparativamente aos restantes. No entanto, a água da nascente apresenta uma fácies hidrogeoquímica cloretada sódico-magnésico-cálcica, constante em todas as campanhas e reveladora da estabilidade do quimismo desta água. Em sintonia com esta tendência está a condutividade elétrica específica, que apresenta em todas as amostragens valores significativamente elevados e concordantes com a alta mineralização desta água.

Tabela 5.30 - Resultados de parâmetros físico-químicos da água da nascente de Montouro entre 1906 e 2013.

Data	Parâmetro									
	SEC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	HCO ₃ (mg/L)	Cl (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	Ca (mg/L)	Na (mg/L)	Mg (mg/L)	K (mg/L)
1906	si	si	si	3266.00	si	202.00	543.00	985.00	415.00	si
Set-06	4820.00	15.00	521.00	804.86	nd	280.80	266.00	424.00	199.00	50.00
Jun-11	4310.00	17.10	521.24	1094.66	4.69	146.47	227.50	310.80	180.50	42.50
Fev-12	3410.00	12.60	567.70	738.10	4.30	132.69	218.70	330.33	169.00	31.23
Jun-13	4680.00	17.03	630.98	1189.63	3.64	145.95	327.25	412.96	267.85	36.07

nd - não determinado; si - sem informação

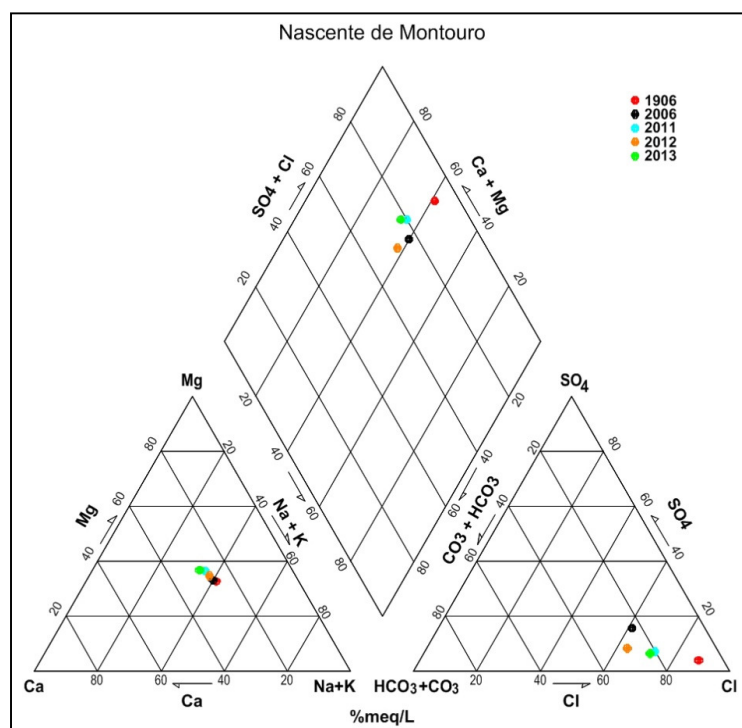


Figura 5.64 - Diagrama Piper das amostras da nascente de Montouro de 1906 a 2013.

5.3.2 - Bacia hidrográfica de Ferveça

A Figura 5.65 e a Figura 5.66 têm a representação em diagrama Piper das amostras da BhF para as campanhas de 2011 e 2012, respetivamente. Na Figura 5.67 está o resumo da classificação destas águas, bem como os valores percentuais de cada fácies, no entanto, deve ser tido em conta que em 2011 foram amostrados dezanove pontos de água enquanto em 2012 a amostragem foi de vinte. Como tal, a análise comparativa da classificação que se segue apenas considera as amostras ensaiadas em ambas as campanhas, excluindo a amostra F09 (sulfatada cálcica, bicarbonatada).

O aumento do teor de Cl e, principalmente, a diminuição de HCO_3 na campanha de 2012 levou as amostras F07 e F17 a ser cloretadas cálcicas em vez de sulfatada cálcica, bicarbonatada e cloretada cálcica, bicarbonatada, respetivamente. Pelo mesmo motivo, F03 sulfatada cálcica, bicarbonatada em 2011, alterou para cloretada, sulfatada cálcica em 2012. A maior concentração de Cl também influenciou a classificação de F02 (sulfatada cálcica, bicarbonatada em 2011 a sulfatada, cloretada cálcica, bicarbonatada em 2012). As amostras F01 e F16 do tipo sulfatada, cloretada cálcica, bicarbonatada e próximas da transição de fácies com o acréscimo de HCO_3 em 2012 tiveram alteração para bicarbonatada cálcica.

No caso de F02, F10 e F15 a composição sulfatada cálcica poderá estar relacionada com atividades antrópicas (agricultura), pois o aumento do ião SO_4 coincide com o aumento do ião K e constata-se a presença de NO_3 nestas águas (Condesso de Melo *et al.*, 2002; Condesso de Melo & Marques da Silva, 2008).

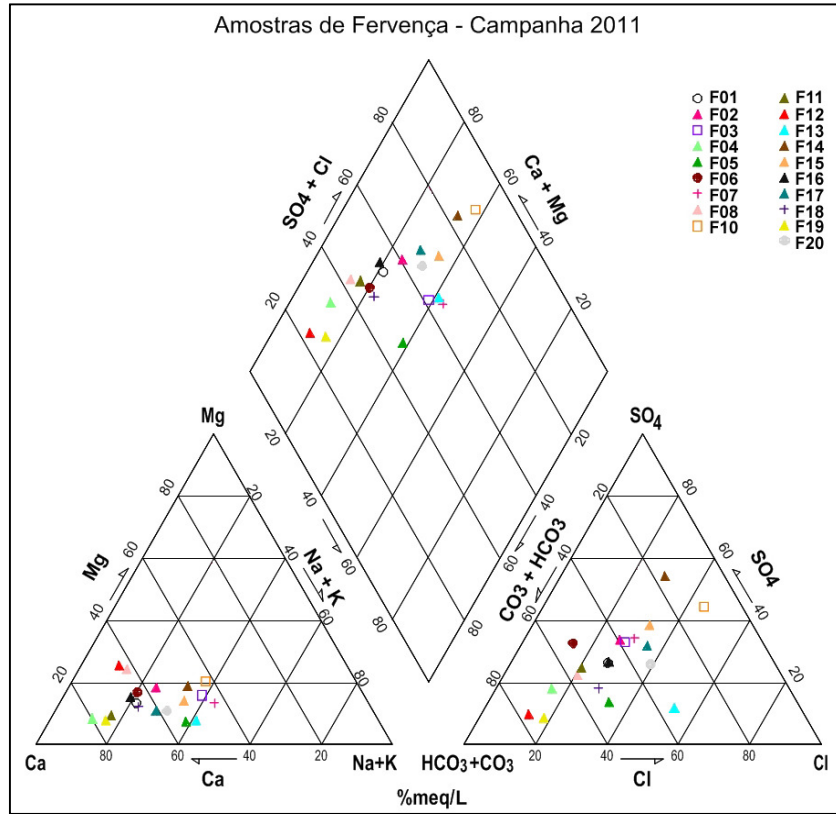


Figura 5.65 - Diagrama Piper das amostras da BhF da campanha de 2011.

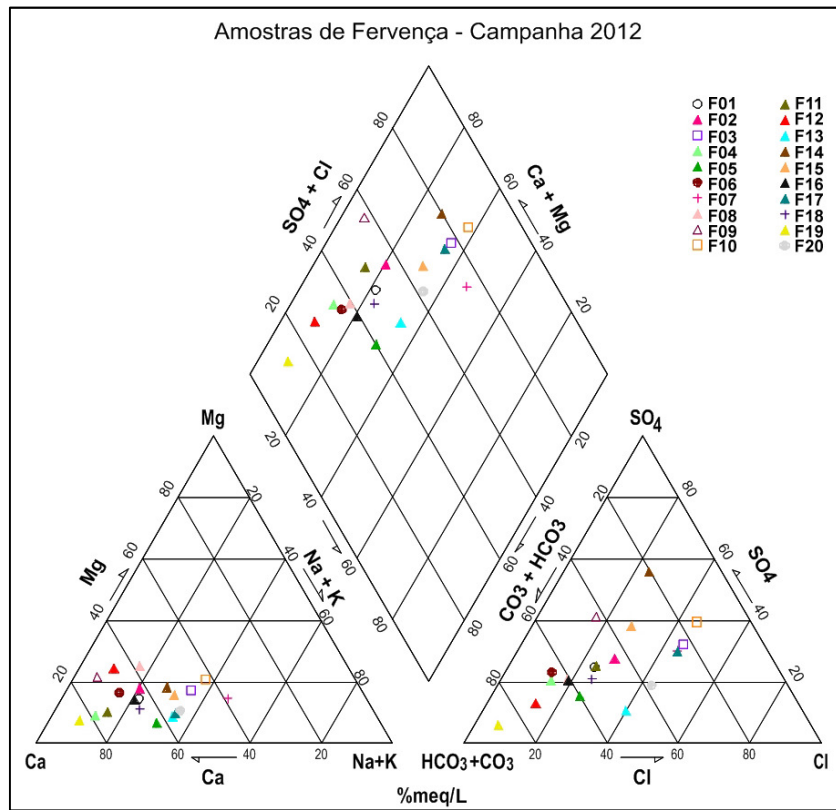


Figura 5.66 - Diagrama Piper das amostras da BhF da campanha de 2012.

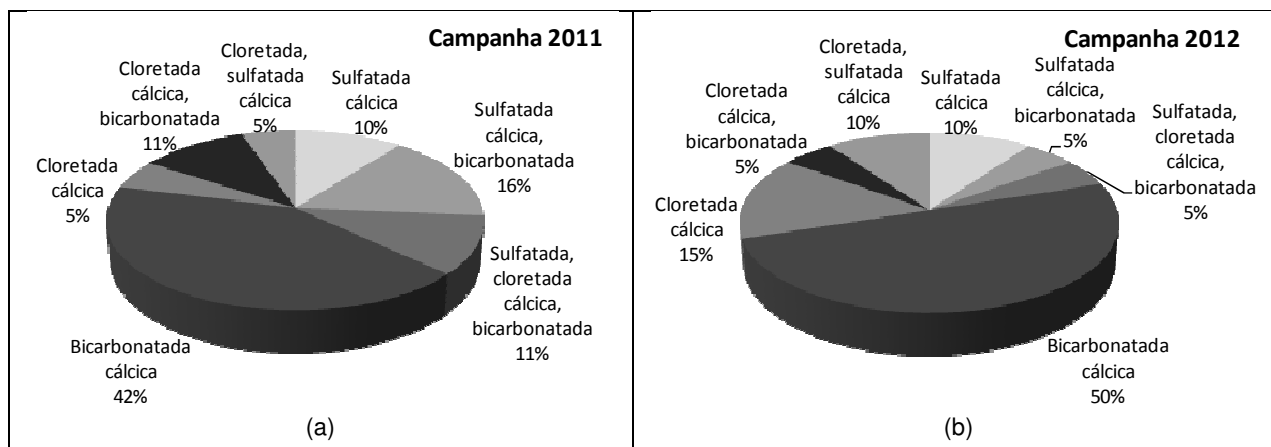


Figura 5.67 - Resumo da classificação das amostras da BhF em 2011 (a) e 2012 (b).

A amostragem de F16 em 2013, após representação em diagrama Piper (Figura 5.68), indica que temos uma água do tipo bicarbonatada cálcica, como aconteceu na campanha de 2012. A inclusão dos resultados de 2011 e 2012 permitem visualizar a evolução hidroquímica da água.

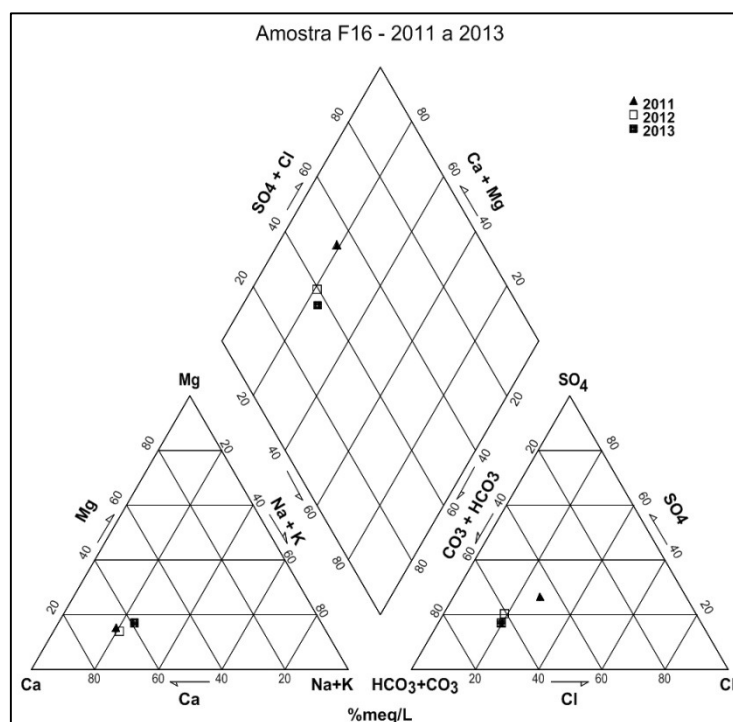


Figura 5.68 - Diagrama Piper das amostras de F16 de 2011 a 2013.

A projeção em diagrama Piper da análise química da água da exurgência Olhos da Ferverença está representada na Figura 5.69 e indica uma água de composição bicarbonatada cálcica, que confirma a sua circulação através de formações calcárias.

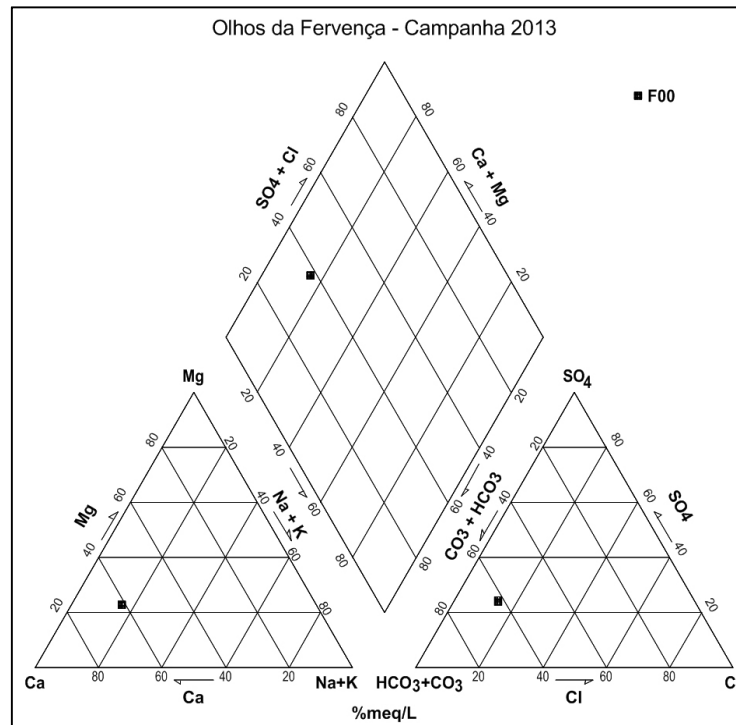


Figura 5.69 - Diagrama Piper da amostra da exurgência de Olhos da Ferverença.

Em síntese, podemos afirmar que as águas analisadas na bacia hidrográfica de Ferverença evidenciam um predomínio da fácies bicarbonatada cálcica, presente em associação com as formações carbonatadas (Figura 5.70) e muito semelhantes à que emerge em Olhos da Ferverença. As restantes águas estão distribuídas por fácies sulfatada e/ou cloretada cálcica, por vezes bicarbonatada relacionadas com as formações cretácicas e quaternárias.

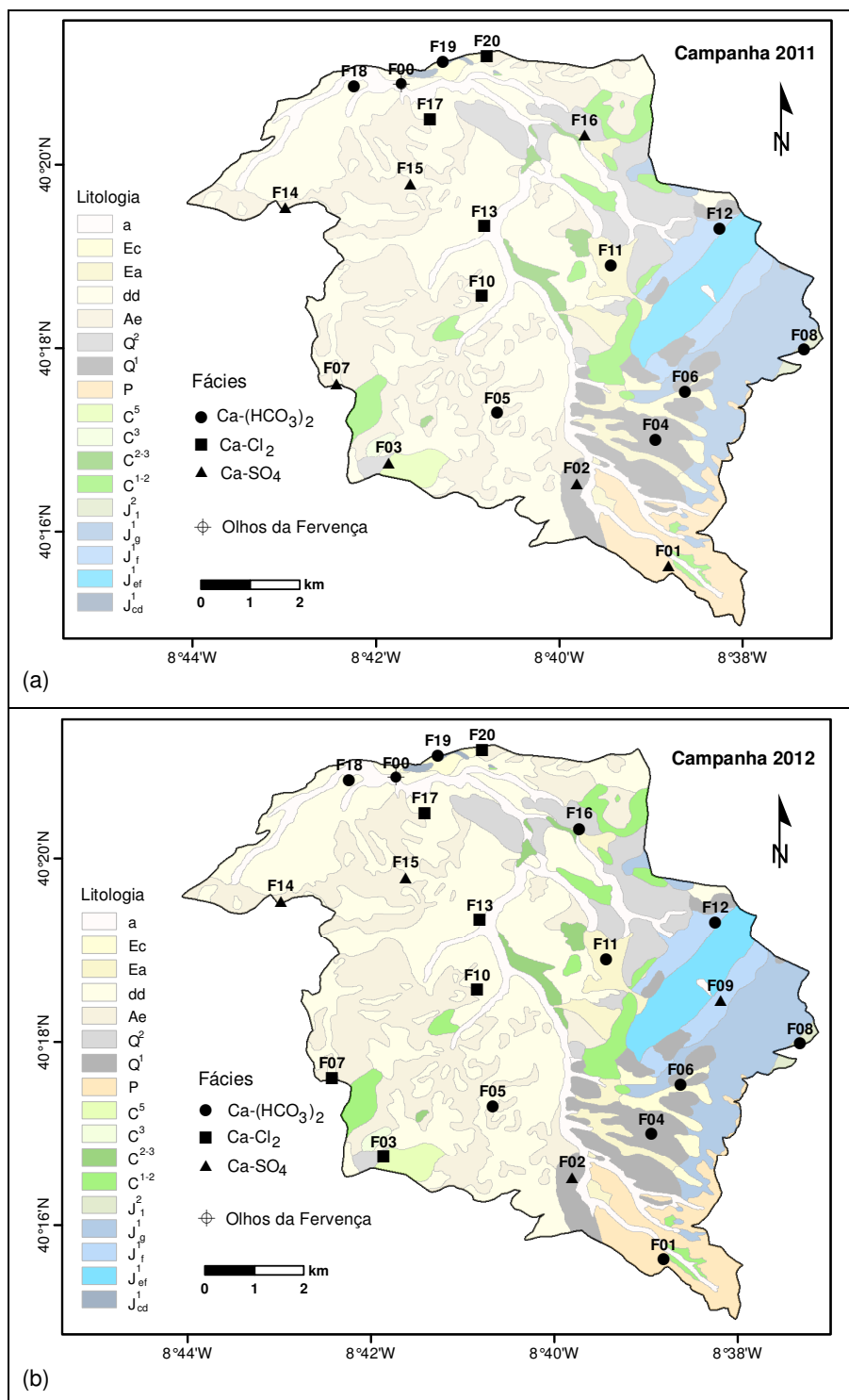


Figura 5.70 - Distribuição espacial da fácies hidroquímica da água na BhF em 2011 (a) e 2012 (b), representada sobre mapa geológico.

5.4 - Processos hidrogeoquímicos

As propriedades geoquímicas da água subterrânea dependem do quimismo da água na área de recarga bem como dos diferentes processos geoquímicos que ocorrem no subsolo (Rajmohan & Elango, 2004).

Alguns dos processos hidrogeoquímicos mais frequentemente identificados nas águas subterrâneas são: (1) processo de mistura, caracterizado pela recarga através de água superficial como rios e lagos; (2) processo de alteração de silicatos; (3) equilíbrios geoquímicos e reações, permitem estimar quais os minerais que poderão reagir com a água subterrânea com base nos seus campos de estabilidade; (4) processo de evaporação, responsável por um aumento nas concentrações de todas as espécies da água; (5) dissolução e precipitação de minerais de acordo com a sua reatividade, podendo ser inferido com recurso ao índice de saturação; (6) adsorção e troca iónica, de que é exemplo a troca de sódio na água por cálcio e magnésio no material argiloso; (7) atividades antropogénicas, nomeadamente as quantidades de elementos adicionados através da agricultura, da poluição do ar e chuvas ácidas, dos lixiviados e dos metais pesados.

Os resultados das análises químicas permitem estabelecer relações entre os iões dissolvidos na água possibilitando a determinação de razões iónicas ou, também designados, índices hidrogeoquímicos. Os trabalhos de Schoeller (1956), White (1960) e White *et al.* (1963) são dos primeiros a utilizar estas razões iónicas, acreditando que seriam características da água com diferentes origens. Farid *et al.* (2012) indicam que os índices hidrogeoquímicos refletem a origem dos iões e dos processos que controlam as suas concentrações nas águas subterrâneas.

Os índices de saturação da água subterrânea relativamente às fases minerais facultam alguma informação do estado de equilíbrio entre a água subterrânea e os conjuntos de minerais das rochas envoltentes (Njitchoua *et al.*, 1997). Também Morais (2012) refere que os índices de saturação para os minerais mais representativos da rocha aquífera podem ser de grande utilidade na compreensão da estrutura hidrogeoquímica das águas.

Castilho (2008) salienta que a análise dos parâmetros físicos e químicos da água, dos principais índices hidrogeoquímicos e dos índices de saturação em minerais conjugados com a distribuição espacial permite tirar ilações sobre os processos hidrogeoquímicos atuantes nas águas ao longo do seu percurso.

A Tabela 5.31 apresenta uma listagem dos maiores elementos químicos, a principal origem mineral e intervalos de concentração expectáveis em águas doces, segundo Appelo & Postma (2005).

Alguns dos índices hidrogeoquímicos mais utilizados estão sintetizados na Tabela 5.32, com referência aos intervalos de valores e respetiva interpretação.

Seguidamente, apresenta-se a quantificação dos índices hidrogeoquímicos das águas amostradas na microbacia hidrográfica de Montouro e na bacia hidrográfica de Ferveça e a análise do seu significado.

Tabela 5.31 - Intervalos de concentração de elementos químicos em água doce não poluída e respetivas fontes de origem (adaptado de Appelo & Postma, 2005).

Elemento	Concentração (meq/L)	Origem
Na	0.1 - 2	feldspato, sal-gema, zeólito, atmosfera, troca catiónica
K	0.01 - 0.2	feldspato, mica
Mg	0.1 - 4	dolomite, serpentinite, piroxena, anfíbola, olivina, mica
Ca	0.1 - 10	carbonatos, gesso, feldspato, piroxena, anfíbola
Cl	0.05 - 2	sal-gema, atmosfera
HCO ₃	0 - 5	carbonatos, matéria orgânica
SO ₄	0.02 - 10	atmosfera, gesso, sulfuretos
NO ₃	0.001 - 0.2	atmosfera, matéria orgânica
Si	0.08 - 4	silicatos
Fe	0 - 1	silicatos, siderite, hidróxidos, sulfuretos
PO ₄	0 - 0.06	matéria orgânica, fosfatos

Tabela 5.32 - Índices hidrogeoquímicos (adaptado de Schoeller, 1956; Custodio & Llamas, 1983; Meybeck, 1987; Mayo & Loucks, 1995; Katz *et al.*, 1997; Feitosa & Filho, 2000; Rajmohan & Elango, 2004; Castilho, 2008; Farid *et al.*, 2012). r = meq/L.

Índice	Valor teórico	Interpretação
rMg/rCa	0.6	água da chuva
	0.3 - 1.5	água subterrânea
	1	influência de terrenos dolomíticos, com dissolução da dolomite
	> 1	terrenos ricos em silicatos de magnésio
	≈ 5	água do mar
rK/rNa	0.02 - 0.025	água do mar
	≈ 0.04	água da chuva
	0.004 - 0.3	água subterrânea
	< 1	águas naturais em contacto com argilas
rNa/rCl	< 1	dissolução de halite e reações de silicatos ou trocas iónicas absorvendo Na
	≈ 0.9	água do mar
	1	dissolução de halite
	> 1	dissolução mineral (alteração de silicatos) ou outro tipo de troca catiónica, com adsorção de Ca nas argilas e libertação de Na
	1.25	água da chuva
rCa/rSO ₄	< 1	dissolução mineral ou perda de Ca em vez de Na nas trocas catiónicas
	1	dissolução de gesso/anidrite
	> 1	dissolução de carbonatos
rCl/rHCO ₃	0.1 - 5	água subterrânea
	≈ 2.5	água da chuva
	20 - 50	água do mar
rCa/rMg	1	dissolução da dolomite
	> 1	grande contributo da calcite
	> 2	dissolução de minerais silicatados
r(Ca+Mg)/r(SO ₄ +HCO ₃)	< 1	excesso de bicarbonato
	1	dissolução de calcite, dolomite e gesso
	> 1	troca de sódio da água por cálcio e magnésio do material argiloso
rNa/rCa	≈ 2.8	água da chuva

Apresentam-se os índices de saturação (IS) obtidos através do programa PhreeqC (Parkhurst & Appelo, 1999), que determina o parâmetro função do logaritmo do cociente entre o produto da atividade iónica (IAP) e a constante de solubilidade (KT) com base na equação [5.6].

$$IS = \log \frac{IAP}{KT} \quad [5.6]$$

Quando existe equilíbrio entre o mineral e a solução tem-se IS nulo, sempre que IS é positivo isso reflete condições de sobressaturação e revela tendência para precipitação dos minerais, mas um IS negativo sugere dissolução dos minerais, visto que a solução está subsaturada.

5.4.1 - Águas da microbacia hidrográfica de Montouro

Os dados de campo pH, temperatura, Eh e HCO₃ obtidos para as águas da MhM foram projetados em gráficos (Figura 5.71). Os valores de temperatura são relativamente semelhantes entre águas para cada uma das amostragens e as medições de pH revelam-se estáveis entre campanhas sem grandes variações (Figura 5.71 (a)). De salientar o valor de HCO₃ consideravelmente elevado da água da nascente comparativamente às demais águas (Figura 5.71 (b)). Considerando a conjugação do pH com Eh, temos a projeção de todas as águas no domínio de transição correspondente às águas subterrâneas com tendência a uma proximidade com os ambientes em contato com a atmosfera (Figura 5.71 (c)).

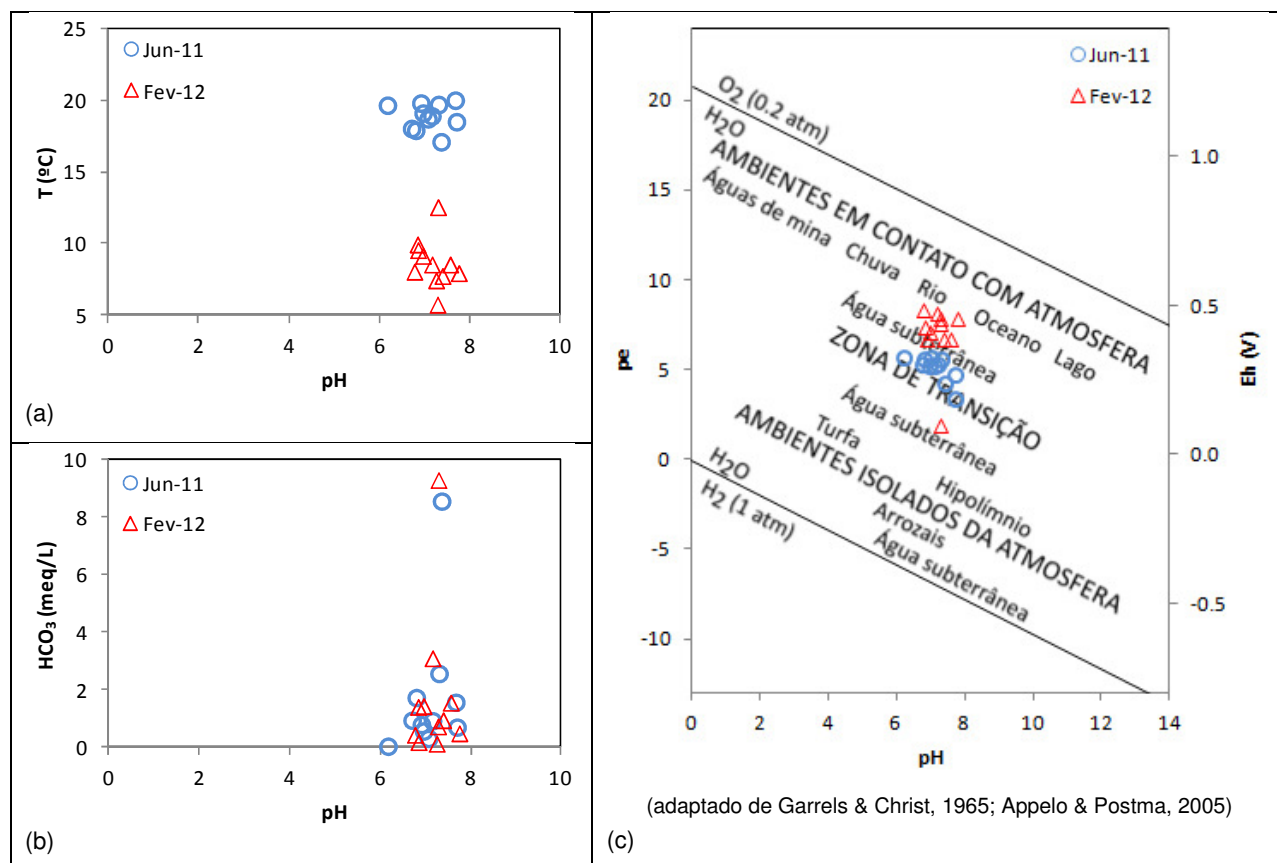


Figura 5.71 - Projeção dos parâmetros de campo T/pH (a) HCO₃/pH (b) e pH/pe/Eh (c) das águas na MhM.

A Tabela 5.33 e a Tabela 5.34 sintetizam os resultados dos índices hidrogeoquímicos, obtidos a partir dos teores em meq/L, das águas da MhM nas campanhas de 2011 e 2012, respetivamente, enquanto os índices da água da nascente são apresentados na Tabela 5.35.

Tabela 5.33 - Resultados dos índices hidrogeoquímicos das águas da MhM em 2011.

Amostra	rNa/rCl	rMg/rCa	rMg/rSO ₄	rCa/rSO ₄	rCa/rHCO ₃	rMg/rHCO ₃	rNa/rCa	rK/rNa	rCa/rMg	rSO ₄ /rCl	rCl/rHCO ₃	r(Ca+Mg)/r(SO ₄ +HCO ₃)	S.A.R.
M01	0.77	0.22	0.48	2.16	1.95	0.43	0.17	0.39	4.53	2.05	0.44	1.25	0.41
M02	1.52	0.14	0.34	2.39	2.09	0.29	0.35	0.14	7.08	1.84	0.47	1.27	0.63
M05	0.68	0.36	0.43	1.19	2.40	0.87	0.51	0.11	2.75	1.11	1.82	1.08	0.54
M06	0.87	0.35	0.58	1.65	2.93	1.03	0.38	0.19	2.85	1.38	1.29	1.42	0.77
M07	0.75	0.14	0.69	5.01	1.32	0.18	0.24	0.13	7.24	0.63	0.41	1.19	0.45
M08	0.86	0.16	0.93	5.93	1.30	0.20	0.75	0.05	6.37	0.20	1.13	1.24	0.99
M10	0.78	0.22	0.57	2.55	59.94	13.35	0.23	0.42	4.49	1.32	17.82	2.99	0.45
M12	1.03	0.25	0.48	1.91	1.71	0.43	0.34	0.09	3.94	1.58	0.56	1.13	0.47
M14	0.98	0.51	0.90	1.77	1.40	0.71	0.24	0.25	1.96	2.29	0.35	1.18	0.53
M19	0.83	0.25	0.71	2.80	5.07	1.28	0.34	0.14	3.97	0.87	2.09	2.26	0.73

Tabela 5.34 - Resultados dos índices hidrogeoquímicos das águas da MhM em 2012.

Amostra	rNa/rCl	rMg/rCa	rMg/rSO ₄	rCa/rSO ₄	rCa/rHCO ₃	rMg/rHCO ₃	rNa/rCa	rK/rNa	rCa/rMg	rSO ₄ /rCl	rCl/rHCO ₃	r(Ca+Mg)/r(SO ₄ +HCO ₃)	S.A.R.
M01	0.81	0.20	0.51	2.54	2.68	0.54	0.16	0.34	4.94	2.04	0.52	1.57	0.40
M02	1.38	0.13	0.77	5.80	2.54	0.34	0.25	0.09	7.51	0.94	0.46	2.00	0.53
M05	0.92	0.31	0.47	1.50	3.88	1.21	0.50	0.09	3.20	1.23	2.10	1.42	0.55
M06	1.12	0.31	1.46	4.64	3.93	1.24	0.27	0.20	3.18	0.90	0.95	2.80	0.79
M07	0.89	0.15	0.84	5.74	1.29	0.19	0.28	0.11	6.84	0.55	0.41	1.20	0.53
M08	1.04	0.13	0.58	4.34	1.78	0.24	0.65	0.06	7.49	0.37	1.12	1.43	1.00
M10	0.72	0.21	0.77	3.61	14.67	3.14	0.23	0.31	4.68	0.87	4.67	3.52	0.44
M12	1.26	0.30	0.58	1.92	2.31	0.70	0.36	0.08	3.31	1.83	0.65	1.37	0.48
M14	1.17	0.40	0.93	2.34	1.46	0.58	0.25	0.18	2.51	1.98	0.32	1.26	0.65
M19	0.91	0.26	1.04	4.03	7.34	1.89	0.34	0.12	3.89	0.66	2.75	3.27	0.79

Tabela 5.35 - Resultados dos índices hidrogeoquímicos da água da nascente de Montouro.

M00	rNa/rCl	rMg/rCa	rMg/rSO ₄	rCa/rSO ₄	rCa/rHCO ₃	rMg/rHCO ₃	rNa/rCa	rK/rNa	rCa/rMg	rSO ₄ /rCl	rCl/rHCO ₃	r(Ca+Mg)/r(SO ₄ +HCO ₃)	S.A.R.
Jun-11	0.44	1.31	4.87	3.72	1.33	1.74	1.19	0.08	0.76	0.10	3.61	2.26	3.73
Fev-12	0.69	1.27	5.03	3.95	1.17	1.49	1.32	0.06	0.78	0.13	2.24	2.06	4.08
Jun-13	0.54	1.26	6.76	5.37	1.58	1.99	1.10	0.05	0.79	0.09	3.24	2.76	4.18

Os resultados de rNa/rCl de 2011 permitem inferir que para a maioria das amostras, nascente inclusive, a dissolução de halite constitui uma importante fonte de mineralização, associada a reações de silicatos e feldspatos ou trocas iónicas que estarão a absorver parte do sódio;

exceção para M02 que indicia dissolução de mineral (alteração de silicatos) ou um segundo tipo de troca catiónica que leva à adsorção de cálcio nas argilas e liberta sódio (Correia *et al.*, 2014a). No entanto, em 2012 as amostras M06, M12 e M14 evidenciam um comportamento semelhante ao de M02.

A dissolução de minerais silicatados é outro processo hidroquímico predominante em quase todas as águas, contribuindo com Ca e Mg para a água e detetado pela razão iónica entre cálcio e magnésio superior a dois (Figura 5.72). Todas as amostras revelam valores de rMg/rCa inferiores aos da água da chuva, no entanto o valor mais alto regista-se em M14 podendo ter associação com as práticas agrícolas do local. No caso da água de Montouro denota a circulação através de terrenos ricos em silicatos de magnésio pois rMg/rCa é superior à unidade.

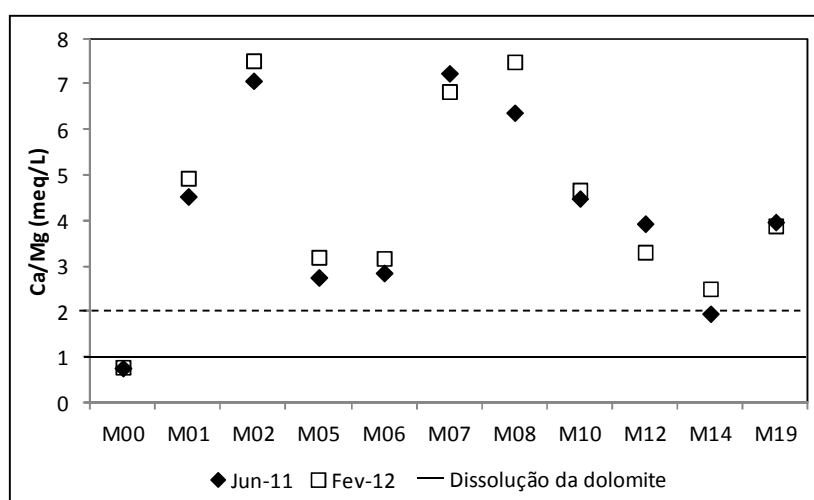


Figura 5.72 - Projeção da razão Ca/Mg das águas da MhM.

A troca de sódio da água por cálcio e magnésio do material argiloso resulta num enriquecimento da água em Ca e Mg que está evidente em todas as águas analisadas e mais explicitamente em M00, M10 e M19 (2011 e 2012) e M02 e M06 (2012) com valores de $r(Ca+Mg)/r(SO_4+HCO_3)$ muito acima da unidade.

Os valores de rCa/rSO_4 superiores aos correspondentes à dissolução do gesso/anidrite, apontam para uma origem suplementar do cálcio (Mendonça *et al.*, 2004) que poderá ser a dissolução de carbonatos (corroborada pelos valores de rCa/rSO_4 superiores à unidade) ou, como anteriormente referido, a troca de Na por Ca. Isto ocorre em ambas as campanhas e também para a nascente de Montouro.

A relação rK/rNa é em todas as amostras menor que um, no entanto, valores mais baixos refletem a possibilidade de fixação preferencial do ião potássio em minerais argilosos (Srinivasamoorthy *et al.*, 2011; Morais, 2012), como poderá ser o caso em M08. Os resultados desta relação para a água da nascente denotam uma redução do quociente entre junho de 2011 e junho de 2013, podendo levar a acreditar numa fixação mais eficiente do ião K.

O índice hidrogeoquímico $rCl/rHCO_3$ é utilizado para caracterizar a intrusão salina ou a mistura com água do mar (Custodio & Llamas, 1983) e para as amostras em estudo constata-se que

todas se encontram dentro do intervalo considerado nas águas subterrâneas, com exceção de M10 em 2011 com um resultado de 17.8 próximo dos valores da água do mar, no entanto, este valor certamente será reflexo da possível contaminação já apontada para este ponto de água, além de que em 2012 o valor desceu abruptamente para 4.7. A água da nascente também tem valores típicos das águas subterrâneas, mas comparando os resultados com os das restantes águas podemos dizer que esta tem valores mais altos (excluindo M10).

Os valores de taxa de adsorção de sódio (S.A.R.) são no geral pequenos e o perigo de salinização do solo é baixo, contrariamente a M00 que evidencia perigo de salinização médio.

5.4.1.1 - Índices de saturação

Os valores obtidos para os índices de saturação dos principais minerais carbonatados, calcite, dolomite e aragonite, bem como para os minerais evaporíticos, gesso, halite e anidrite estão sintetizados na Tabela 5.36. A Figura 5.73 tem os resultados para a nascente de Montouro.

A análise dos resultados permite dizer que existe uma tendência comum e generalizada a todas as amostras (M01 a M19) que revelam subsaturação nos minerais considerados, indiciando que estará a ocorrer a dissolução mineralógica. Entre campanhas os índices de saturação são da mesma ordem de grandeza, mas deteta-se alguma variação, ocorrendo alguns exemplos de estabilidade como M01 (IS_{calcite} e $IS_{\text{aragonite}}$) e M12 (IS_{gesso} e IS_{anidrite}). O índice de saturação da halite revela-se como o de valores mais estáveis entre campanhas e também o de valores mais negativos, semelhante ao ocorrido em outros trabalhos (Mendonça *et al.*, 2004; Castilho, 2008).

Tabela 5.36 - Índices de saturação das águas da MhM.

Amostra	Data	IS_{calcite}	IS_{dolomite}	$IS_{\text{aragonite}}$	IS_{gesso}	IS_{anidrite}	IS_{halite}
M01	Jun-11	-0.85	-2.32	-1.00	-1.72	-1.96	-8.00
	Fev-12	-0.84	-2.48	-1.00	-1.66	-1.91	-7.97
M02	Jun-11	-0.98	-2.77	-1.13	-2.16	-2.40	-8.17
	Fev-12	-0.77	-2.56	-0.93	-2.34	-2.60	-8.17
M05	Jun-11	-1.88	-4.14	-2.02	-2.58	-2.82	-8.28
	Fev-12	-2.40	-5.40	-2.55	-2.59	-2.85	-8.35
M06	Jun-11	-1.32	-3.07	-1.47	-1.79	-2.03	-7.55
	Fev-12	-0.87	-2.33	-1.02	-1.73	-1.99	-7.35
M07	Jun-11	-0.13	-1.05	-0.28	-2.40	-2.64	-8.13
	Fev-12	-0.43	-1.81	-0.58	-2.45	-2.70	-8.03
M08	Jun-11	-1.49	-3.72	-1.64	-3.00	-3.24	-7.79
	Fev-12	-1.23	-3.51	-1.39	-2.63	-2.89	-7.72
M10	Jun-11	nc	nc	nc	nc	nc	nc
	Fev-12	-1.81	-4.44	-1.97	-2.24	-2.49	-8.06
M12	Jun-11	-0.74	-2.03	-0.89	-2.40	-2.65	-8.41
	Fev-12	-0.96	-2.56	-1.11	-2.39	-2.65	-8.44
M14	Jun-11	-0.14	-0.51	-0.29	-1.63	-1.87	-7.77
	Fev-12	-0.28	-1.08	-0.44	-1.54	-1.79	-7.58
M19	Jun-11	-1.21	-2.97	-1.36	-1.97	-2.21	-7.59
	Fev-12	-1.64	-3.99	-1.79	-2.00	-2.26	-7.47

nc - não converge

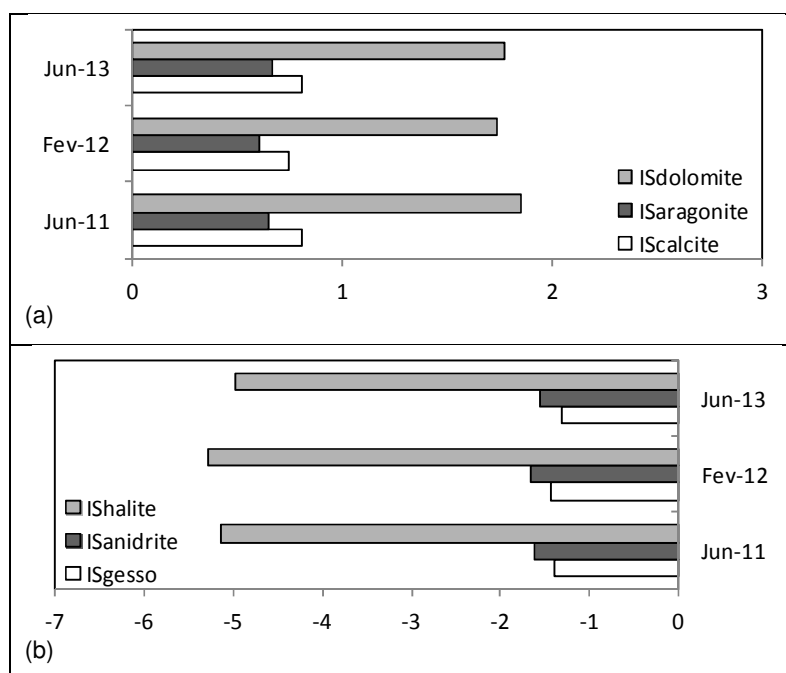


Figura 5.73 - Índices de saturação de minerais carbonatados (a) e evaporíticos (b) da água da nascente de Montouro.

No caso da amostra M10, em 2011 não existe convergência dos valores, não sendo possível determinar os índices de saturação em qualquer mineral, sendo que este facto estará relacionado com o elevado teor em alumínio que a amostra registou nessa campanha.

Relativamente à nascente de Montouro, os valores indicam comportamento diferente das restantes águas com sobressaturação de minerais carbonatados e, conseqüentemente, capacidade de existir a sua precipitação; no caso dos minerais evaporíticos o IS é negativo, revelador da sua possível dissolução, o que está concordante com o indicado pelas razões iónicas anteriormente referidas.

Por comparação, as amostras da microbacia hidrográfica estão mais subsaturadas em gesso e anidrite que M00, podendo este facto ser indicativo de remoção do sulfato da solução, consequência do processo de redução deste ião.

5.4.2 - Águas da bacia hidrográfica de Ferveça

A Figura 5.74 tem a representação gráfica dos parâmetros de campo pH, temperatura, Eh e HCO_3 determinados para as águas da bacia hidrográfica de Ferveça. São notórias as diferenças de temperatura que individualizam a campanha de verão da de inverno (Figura 5.74 (a)). Os valores mais elevados de HCO_3 estão associados à fácies bicarbonatada cálcica (Figura 5.74 (b)). No diagrama pe/pH as águas projetam-se como águas subterrâneas no domínio de transição com tendência a uma proximidade com os ambientes em contato com a atmosfera (Figura 5.74 (c)).

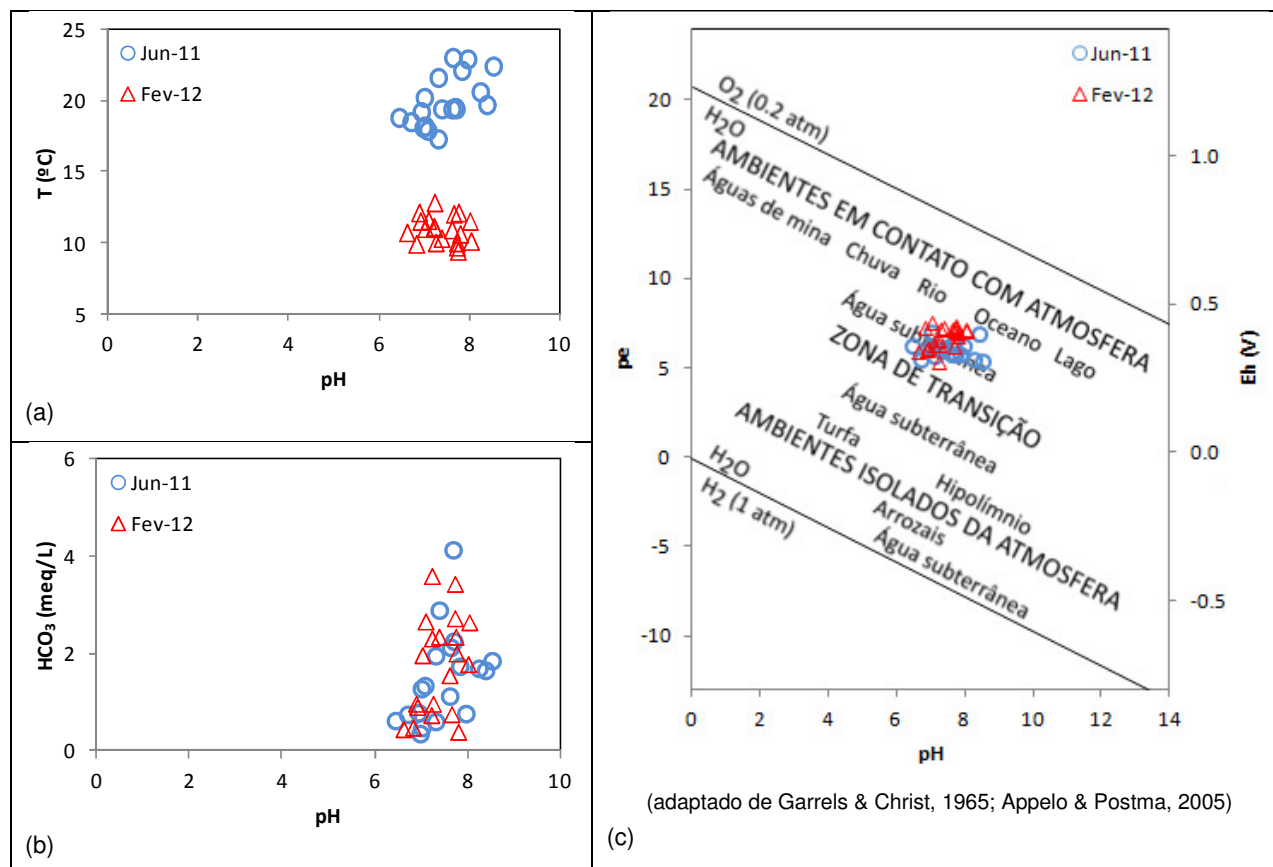


Figura 5.74 - Projeção dos parâmetros de campo T/pH (a) HCO_3/pH (b) e pH/pe/Eh (c) das águas da BhF.

Os resultados dos índices hidrogeoquímicos, calculados a partir dos teores em meq/L, da água da exurgência Olhos da Ferverça estão expressos na Tabela 5.37 e para as águas da BhF na Tabela 5.38 e na Tabela 5.39 em 2011 e em 2012, respetivamente.

Tabela 5.37 - Resultados dos índices hidrogeoquímicos da água da exurgência de Olhos da Ferverça.

F00	rNa/rCl	rMg/rCa	rMg/rSO ₄	rCa/rSO ₄	rCa/rHCO ₃	rMg/rHCO ₃	rNa/rCa	rK/rNa	rCa/rMg	rSO ₄ /rCl	rCl/rHCO ₃	r(Ca+Mg)/r(SO ₄ +HCO ₃)	S.A.R.
Jun-13	0.98	0.37	0.87	2.35	0.91	0.34	0.24	0.08	2.69	1.75	0.22	0.90	0.49

Os valores da razão iónica entre sódio e cloreto apontam para predomínio de dissolução de halite com associação a reações de silicatos e feldspatos ou trocas iónicas que podem estar a absorver parte do sódio. Exceção para as amostras F03, F06 e F07 em 2011 e F04, F06, F10, F14, F15 e F16 em 2012 que indicará dissolução mineral (alteração de silicatos) ou outro tipo de troca catiónica que promove a adsorção de Ca nas argilas e a libertação de Na.

Todas as águas demonstram a ocorrência de dissolução de silicatos, evidenciada pelo enriquecimento em cálcio e magnésio e com rCa/rMg superior a dois (Figura 5.75 e Tabela 5.37). O enriquecimento da água em Ca e Mg também é notório através da razão iónica entre (Ca+Mg) e (SO₄+HCO₃), sendo possível identificar este processo em quase todas as amostras com exceção em 2011 de F07 (manifesta excesso de bicarbonato) e F14 (denota dissolução de

calcite, dolomite e gesso), e em 2012 a amostra F19 que apresenta excesso de bicarbonato. No caso de Olhos da Ferverença o índice remete para bicarbonato em excesso. A razão rMg/rCa em todas as amostras está abaixo do apresentado pela água da chuva (Tabela 5.32).

Tabela 5.38 - Resultados dos índices hidrogeoquímicos das águas da BhF em 2011.

Amostra	rNa/rCl	rMg/rCa	rMg/rSO ₄	rCa/rSO ₄	rCa/rHCO ₃	rMg/rHCO ₃	rNa/rCa	rK/rNa	rCa/rMg	rSO ₄ /rCl	rCl/rHCO ₃	r(Ca+Mg)/r(SO ₄ +HCO ₃)	S.A.R.
F01	0.76	0.21	0.69	3.32	1.89	0.39	0.23	0.42	4.82	0.98	0.58	1.45	0.44
F02	0.97	0.32	0.79	2.45	2.11	0.68	0.31	0.39	3.12	1.27	0.68	1.50	0.76
F03	1.09	0.35	0.67	1.91	1.64	0.57	0.49	0.74	2.86	1.16	0.74	1.19	0.88
F04	1.05	0.11	0.68	6.39	1.76	0.19	0.14	0.05	9.45	1.18	0.23	1.52	0.37
F05	0.88	0.14	0.73	5.20	1.34	0.19	0.42	0.68	7.10	0.40	0.64	1.22	0.73
F06	1.53	0.27	0.58	2.18	1.35	0.36	0.30	0.05	3.74	2.31	0.27	1.06	0.57
F07	1.14	0.31	0.45	1.45	1.42	0.44	0.70	0.43	3.19	1.12	0.87	0.94	0.80
F08	0.64	0.39	1.10	2.82	1.10	0.43	0.21	0.04	2.57	1.09	0.36	1.10	0.34
F09	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
F10	0.94	0.49	0.81	1.67	6.88	3.34	0.57	0.54	2.06	0.98	4.19	1.99	1.03
F11	0.98	0.13	0.48	3.75	1.70	0.22	0.22	0.02	7.86	1.21	0.38	1.32	0.64
F12	0.83	0.40	2.76	6.94	0.88	0.35	0.16	0.04	2.52	0.74	0.17	1.09	0.37
F13	0.74	0.16	0.65	4.22	1.41	0.22	0.78	0.03	6.45	0.22	1.50	1.22	0.84
F14	0.92	0.40	0.38	0.95	3.09	1.22	0.52	0.34	2.53	1.87	1.74	1.01	0.96
F15	0.93	0.28	0.44	1.57	2.13	0.59	0.50	0.34	3.62	1.18	1.14	1.15	0.72
F16	0.84	0.23	0.83	3.53	2.03	0.48	0.24	0.19	4.27	0.98	0.59	1.59	0.64
F17	0.72	0.18	0.35	1.95	1.90	0.34	0.41	0.13	5.57	0.91	1.08	1.13	0.64
F18	0.75	0.19	0.70	3.74	1.28	0.24	0.31	0.12	5.33	0.64	0.54	1.13	0.64
F19	0.66	0.10	0.99	9.80	1.18	0.12	0.14	0.52	9.88	0.49	0.24	1.16	0.26
F20	0.70	0.19	0.39	2.10	1.57	0.30	0.50	0.08	5.33	0.66	1.13	1.07	0.71

nd - não determinado

Na BhF, incluindo a própria exurgência, as águas têm concentrações características de dissolução de carbonatos, expressa pelos resultados de rCa/rSO₄ acima da unidade e que, no caso de F19, até se manifesta com um valor muito elevado. Associa-se alguma dissolução de gesso/anidrite. Apenas em 2011 a amostra F14, com um valor inferior a um, indica relação com dissolução mineral ou perda de Ca em vez de Na nas trocas catiónicas.

A totalidade das águas ensaiadas, inclusive F00, tem valores inferiores à unidade para a razão iónica entre o potássio e o sódio, com as amostras F04, F06, F08, F11, F12 (apenas em 2011) e F13 a apresentarem valores muito reduzidos (< 0.05) que poderão indicar uma tendência preferencial para a fixação do ião K.

No que diz respeito à avaliação de eventual presença de intrusão salina a razão iónica rCl/rHCO₃ não aponta nesse sentido em nenhuma das águas da bacia hidrográfica de Ferverença, nem na água da exurgência.

O perigo de salinização do solo da BhF é baixo, uma vez que todas as amostras têm valores de S.A.R. muito pequenos.

Tabela 5.39 - Resultados dos índices hidrogequímicos das águas da BhF em 2012.

Amostra	rNa/rCl	rMg/rCa	rMg/rSO ₄	rCa/rSO ₄	rCa/rHCO ₃	rMg/rHCO ₃	rNa/rCa	rK/rNa	rCa/rMg	rSO ₄ /rCl	rCl/rHCO ₃	r(Ca+Mg)/r(SO ₄ +HCO ₃)	S.A.R.
F01	0.78	0.23	0.68	2.95	1.44	0.33	0.25	0.34	4.34	1.04	0.47	1.19	0.48
F02	0.84	0.29	0.94	3.25	2.01	0.58	0.27	0.22	3.46	0.96	0.65	1.60	0.73
F03	0.91	0.36	0.89	2.46	3.57	1.29	0.51	0.43	2.76	0.72	2.03	1.98	1.17
F04	1.13	0.12	0.60	5.20	1.64	0.19	0.15	0.03	8.69	1.46	0.22	1.39	0.42
F05	0.88	0.10	0.50	4.76	1.23	0.13	0.30	0.65	9.57	0.63	0.41	1.08	0.62
F06	1.45	0.24	0.91	3.75	1.36	0.33	0.21	0.04	4.14	1.80	0.20	1.24	0.52
F07	0.94	0.38	0.60	1.60	1.92	0.72	0.87	0.38	2.66	0.68	1.77	1.20	0.93
F08	0.60	0.43	1.54	3.55	1.23	0.53	0.15	0.05	2.30	1.13	0.31	1.31	0.26
F09	0.79	0.30	0.64	2.16	2.09	0.62	0.14	0.09	3.35	2.52	0.38	1.38	0.37
F10	1.08	0.50	0.92	1.85	4.84	2.40	0.67	0.33	2.01	0.87	3.01	2.00	1.19
F11	0.92	0.13	0.61	4.51	2.27	0.30	0.20	0.02	7.44	1.04	0.48	1.71	0.60
F12	0.88	0.37	2.43	6.52	1.16	0.43	0.14	0.06	2.69	0.97	0.18	1.35	0.34
F13	0.88	0.15	0.86	5.78	1.23	0.18	0.58	0.02	6.73	0.26	0.81	1.17	0.74
F14	1.06	0.34	0.37	1.11	3.02	1.02	0.42	0.24	2.96	2.32	1.18	1.08	0.87
F15	1.07	0.29	0.57	1.94	2.16	0.64	0.40	0.45	3.39	1.37	0.82	1.32	0.70
F16	1.14	0.21	0.82	3.81	1.28	0.28	0.28	0.13	4.67	1.07	0.31	1.17	0.77
F17	0.98	0.17	0.45	2.60	3.08	0.53	0.57	0.08	5.78	0.67	1.78	1.65	0.88
F18	0.97	0.17	0.62	3.63	1.41	0.24	0.32	0.11	5.89	0.82	0.47	1.19	0.77
F19	0.90	0.09	1.19	13.33	0.92	0.08	0.07	0.38	11.18	0.91	0.08	0.94	0.16
F20	0.92	0.20	0.69	3.47	1.74	0.35	0.60	0.09	5.00	0.44	1.13	1.39	0.88

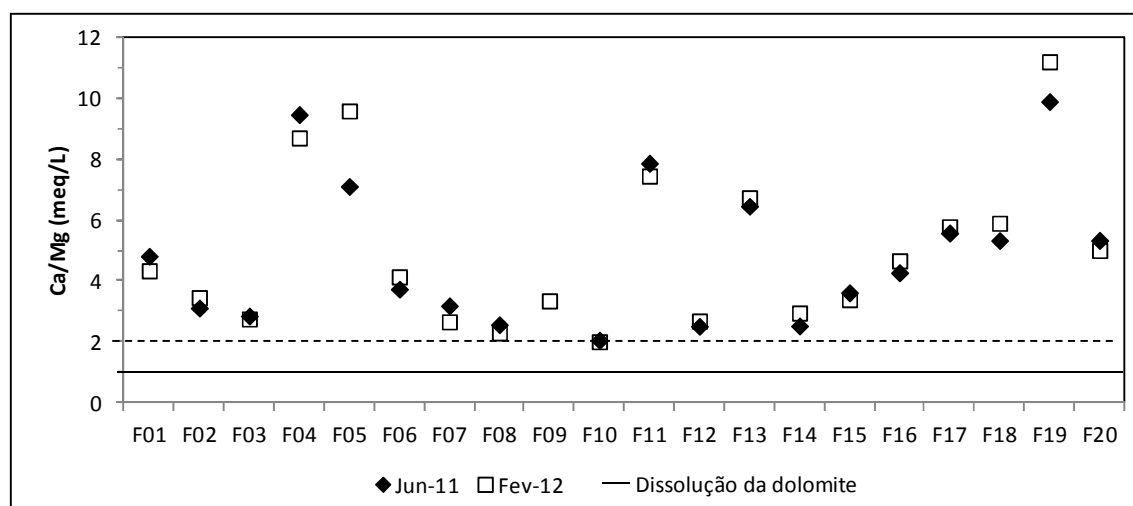


Figura 5.75 - Projeção da razão Ca/Mg das águas da BhF.

5.4.2.1 - Índices de saturação

Na Tabela 5.40 apresenta-se o resumo dos valores dos índices de saturação determinados para os principais minerais carbonatados (calcite, dolomite e aragonite) e para os minerais evaporíticos como gesso, halite e anidrite, em ambas as campanhas das águas da bacia

hidrográfica de Ferverça. Na Figura 5.76 estão os resultados para a água da exurgência Olhos da Ferverça, obtidos em 2013.

Tabela 5.40 - Índices de saturação das águas da BHF.

Amostra	Data	IS _{calcite}	IS _{dolomite}	IS _{aragonite}	IS _{gesso}	IS _{anidrite}	IS _{halite}
F01	Jun-11	-0.37	-1.37	-0.52	-2.24	-2.48	-8.14
	Fev-12	-0.34	-1.39	-0.49	-2.12	-2.37	-8.00
F02	Jun-11	0.94	1.49	0.80	-1.73	-1.96	-7.49
	Fev-12	-0.16	-0.95	-0.32	-1.67	-1.93	-7.36
F03	Jun-11	-0.89	-2.21	-1.04	-2.03	-2.27	-7.63
	Fev-12	-0.81	-2.15	-0.96	-1.80	-2.05	-7.10
F04	Jun-11	0.26	-0.39	0.11	-2.05	-2.29	-8.20
	Fev-12	0.25	-0.53	0.10	-1.86	-2.12	-8.04
F05	Jun-11	-0.99	-2.76	-1.14	-2.59	-2.83	-7.87
	Fev-12	-0.80	-2.65	-0.95	-2.27	-2.53	-7.85
F06	Jun-11	0.46	0.42	0.31	-2.01	-2.25	-8.15
	Fev-12	0.46	0.20	0.30	-1.89	-2.14	-8.01
F07	Jun-11	-1.28	-2.97	-1.42	-2.60	-2.83	-8.14
	Fev-12	-1.17	-2.86	-1.33	-2.69	-2.94	-7.92
F08	Jun-11	0.50	0.66	0.36	-2.28	-2.51	-8.28
	Fev-12	0.12	-0.19	-0.03	-2.21	-2.47	-8.09
F09	Jun-11	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	Fev-12	0.16	-0.27	0.00	-1.55	-1.80	-8.23
F10	Jun-11	-1.54	-3.36	-1.69	-1.91	-2.16	-7.35
	Fev-12	-1.68	-3.76	-1.84	-1.95	-2.21	-7.27
F11	Jun-11	0.10	-0.63	-0.04	-1.70	-1.94	-7.60
	Fev-12	0.25	-0.48	0.09	-1.69	-1.95	-7.56
F12	Jun-11	0.46	0.58	0.31	-2.18	-2.42	-8.04
	Fev-12	0.30	0.07	0.15	-2.05	-2.31	-8.08
F13	Jun-11	-1.77	-4.32	-1.92	-3.18	-3.43	-8.03
	Fev-12	-0.90	-2.69	-1.05	-3.04	-3.29	-8.07
F14	Jun-11	-1.20	-2.74	-1.34	-1.65	-1.89	-7.42
	Fev-12	-1.17	-2.87	-1.33	-1.53	-1.79	-7.48
F15	Jun-11	-1.99	-4.49	-2.14	-2.29	-2.53	-7.97
	Fev-12	-1.34	-3.27	-1.49	-2.07	-2.32	-7.85
F16	Jun-11	0.20	-0.12	0.06	-1.77	-2.00	-7.55
	Fev-12	-0.08	-0.88	-0.23	-1.74	-1.99	-7.48
F17	Jun-11	-1.62	-3.94	-1.77	-2.30	-2.55	-7.96
	Fev-12	-2.11	-5.06	-2.26	-2.42	-2.67	-7.79
F18	Jun-11	-0.40	-1.51	-0.55	-2.15	-2.39	-7.72
	Fev-12	-0.40	-1.65	-0.55	-1.92	-2.18	-7.56
F19	Jun-11	0.09	-0.71	-0.05	-2.69	-2.92	-8.57
	Fev-12	-0.56	-2.23	-0.71	-2.67	-2.92	-9.04
F20	Jun-11	-0.34	-1.31	-0.49	-2.45	-2.68	-7.92
	Fev-12	-1.32	-3.41	-1.47	-2.58	-2.83	-7.78

nd - não determinado

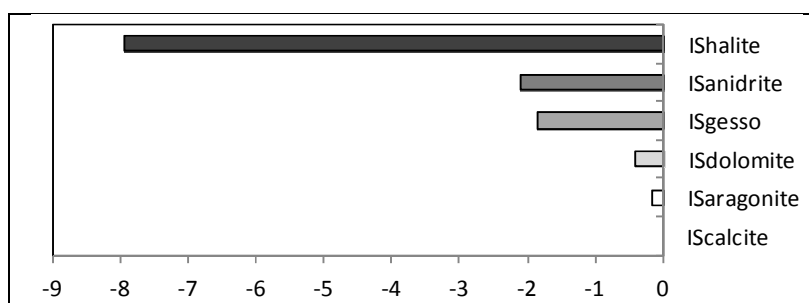


Figura 5.76 - Índices de saturação de minerais carbonatados e evaporíticos da água da exsurgência de Olhos da Ferverença.

Como anteriormente referido, e confirmado pelos valores de índice de saturação, há uma tendência generalizada para a dissolução mineral de carbonatos e evaporitos na bacia hidrográfica de Ferverença, revelando F00 um comportamento idêntico. Marques da Silva (2009) também indica a possibilidade de haver evaporitos interestratificados nas formações. No entanto, excetuam-se as amostras em que existem condições de sobressaturação, ou próximas do equilíbrio relativamente a todos os minerais carbonatados apresentados, como é o caso de F02, F06, F08 e F12 em 2011 e F06 e F12 em 2012. Exibem IS positivos ou nulos para a calcite e a aragonite as amostras F04 e F16 em 2011 e em 2012 as amostras F04, F09 e F11. Em 2011 constata-se que F11 e F19 apresentam IS_{calcite} positivo. As condições preferenciais de precipitação destes minerais carbonatados manifestam-se maioritariamente nas amostras de fácies $\text{Ca}-(\text{HCO}_3)_2$.

5.4.3 - Síntese dos processos hidrogeoquímicos

Numa tentativa de sintetizar a informação referida sobre os processos hidrogeoquímicos presentes em ambas as bacias hidrográficas e como, em termos gerais, há semelhanças, elaborou-se o esquema da Figura 5.77.

A formação de águas do tipo $\text{Ca}-(\text{HCO}_3)_2$ é resultado da dissolução de minerais carbonatados, através da água da superfície (segundo Condesso de Melo (2002) na região a água da chuva é cloretada cálcica) carregada com CO_2 atmosférico e biogénico que se infiltrou no subsolo. A adsorção de Ca nas argilas (com possível libertação de Na) e a precipitação de carbonatos promovem a remoção do cálcio da água que, segundo Freeze & Cherry (1979), pode causar perturbação no equilíbrio químico levando à dissolução de minerais como gesso e anidrite. Por outro lado, criam-se condições para o desenvolvimento de águas de fácies $\text{Ca}-\text{SO}_4$. A redução do ião sulfato leva à formação de águas $\text{Ca}-(\text{HCO}_3)_2$. O progressivo enriquecimento em Cl, proveniente da dissolução de halite, conjugado com processos de absorção de Na favorecem a formação de águas $\text{Ca}-\text{Cl}_2$.

A alteração de silicatos pode funcionar como um processo alimentador de Ca e Mg.

Adams *et al.* (2001) referem que a formação de águas do tipo Na-Cl e $\text{Ca}-\text{Cl}_2$ é o resultado da progressiva salinização das águas, mas para elevadas salinidades o processo de troca catiónica inversa pode criar águas $\text{Ca}-\text{Cl}_2$ por remoção de Na ou, alternativamente, estas águas podem ser o resultado do processo de mistura entre uma água mais nova e uma água mais

antiga e mais salina. Esta última hipótese poderá adequar-se ao caso da água da nascente de Montouro.

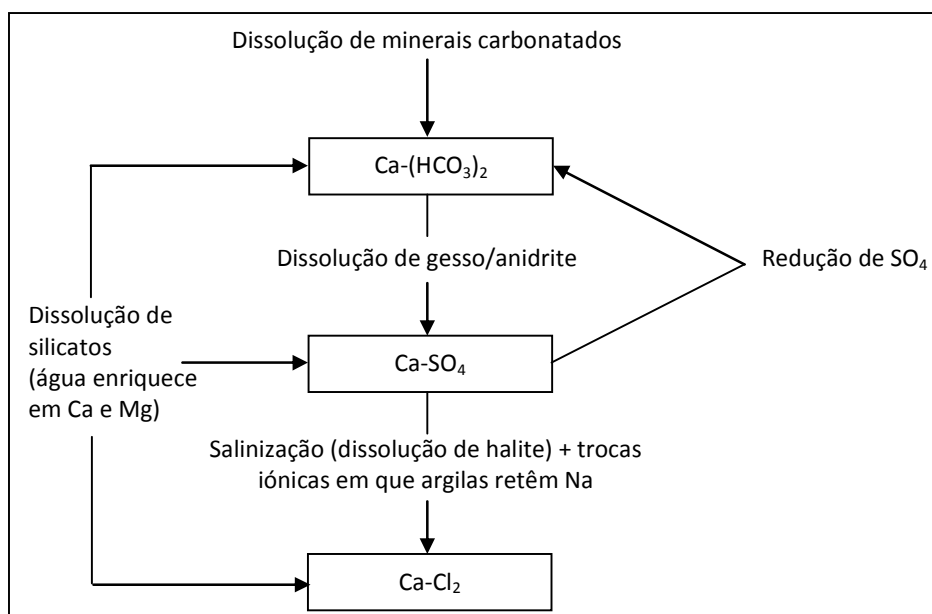


Figura 5.77 - Principais processos hidrogeoquímicos responsáveis pelos tipos de água nas áreas de estudo.

5.5 - Coeficiente de correlação de Spearman

Na tentativa de detetar a existência de correlações entre os diversos parâmetros, determinados *in situ* e em laboratório, realizou-se a quantificação do coeficiente de correlação de Spearman, recorrendo à utilização do *software* SPSS (IBM, 2013). Os resultados para as campanhas de 2011 e de 2012 estão sintetizados na Tabela 5.41 para as águas da MhM e na Tabela 5.42 para as águas da BhF. São inúmeras as correlações acima de 0.60 (positivas ou negativas) podendo denotar a existência de diferentes processos como o incremento ou decréscimo da mineralização da água, a dissolução/precipitação de carbonatos, a adsorção e troca iónica, a alteração de silicatos e a influência antrópica (Castilho, 2008). A dependência positiva e elevada (> 0.90) entre a condutividade elétrica específica e a salinidade verifica-se em ambas as bacias hidrográficas e em ambas as campanhas e era já espetável.

Relativamente à MhM as correlações mais elevadas, superiores a 0.90, e com probabilidade de certeza superior a 99 %, foram obtidas entre a condutividade elétrica específica e o cálcio e o magnésio; entre a salinidade e o cálcio; entre o sulfato e o magnésio, considerando simultaneamente as duas campanhas em análise. No entanto, outras correlações igualmente superiores a 0.90 foram apenas verificadas numa campanha, como é o caso da relação entre o magnésio e o cálcio em 2011, ou entre a condutividade elétrica específica e o potássio, entre a salinidade e o cloreto, o sódio e o potássio, entre o cloreto e o sódio e entre o cálcio e o potássio em 2012. Estas fortes correlações confirmam alguns dos efeitos anteriormente inumerados, nomeadamente a possível influência de formações evaporíticas, ou as trocas iónicas resultantes do contacto com minerais silicatados.

Tabela 5.41 - Coeficientes de correlação de Spearman entre os parâmetros físico-químicos relativos às águas da MhM.

		T (°C)	pH	SEC (µS/cm)	Sal (%)	OD (mg/L)	Eh (mV)	Turb (NTU)	HCO ₃ (mg/L)	Cl (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	PO ₄ (µg/L)	Ca (mg/L)	Na (mg/L)	Mg (mg/L)	K (mg/L)	Al (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)
T (°C)	Coefficiente de Correlação	1.000	-0.333	0.478	0.532	-0.724*	-0.501	0.123	0.515	0.401	0.638*	-0.105	0.834**	0.515	0.328	0.533	0.556	0.310	0.683*	0.460
	Significância		0.318	0.137	0.092	0.012	0.116	0.719	0.105	0.222	0.035	0.759	0.001	0.105	0.325	0.091	0.076	0.354	0.020	0.154
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
pH	Coefficiente de Correlação	0.055	1.000	-0.364	-0.379	0.318	-0.282	-0.255	0.236	-0.473	-0.336	-0.600	-0.196	-0.309	-0.300	-0.309	-0.355	-0.245	-0.264	-0.327
	Significância	0.873		0.272	0.251	0.340	0.401	0.450	0.484	0.142	0.312	0.051	0.563	0.355	0.370	0.355	0.285	0.467	0.433	0.326
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
SEC (µS/cm)	Coefficiente de Correlação	-0.336	-0.091	1.000	0.972**	-0.127	0.109	0.809**	0.564	0.882**	0.782**	0.364	0.290	0.982**	0.855**	0.918**	0.955**	0.009	0.373	0.455
	Significância	0.312	0.790		0.000	0.709	0.750	0.003	0.071	0.000	0.004	0.272	0.387	0.000	0.001	0.000	0.000	0.979	0.259	0.160
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Sal (%)	Coefficiente de Correlação	-0.268	-0.127	0.965**	1.000	-0.234	0.033	0.734*	0.664*	0.930**	0.743**	0.238	0.337	0.972**	0.902**	0.851**	0.944**	-0.084	0.496	0.337
	Significância	0.425	0.710	0.000		0.489	0.924	0.010	0.026	0.000	0.009	0.480	0.312	0.000	0.000	0.001	0.000	0.806	0.121	0.311
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
OD (mg/L)	Coefficiente de Correlação	0.109	0.000	0.009	-0.042	1.000	0.345	0.000	-0.300	-0.155	-0.491	0.164	-0.785**	-0.191	0.009	-0.227	-0.282	-0.045	-0.736**	-0.182
	Significância	0.750	1.000	0.979	0.902		0.298	1.000	0.370	0.650	0.125	0.631	0.004	0.574	0.979	0.502	0.401	0.894	0.010	0.593
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Eh (mV)	Coefficiente de Correlação	0.173	-0.673*	0.427	0.424	0.136	1.000	0.373	-0.327	0.136	0.091	0.500	-0.580	0.000	0.064	0.191	-0.009	0.018	-0.591	-0.145
	Significância	0.612	0.023	0.190	0.194	0.689		0.259	0.326	0.689	0.790	0.117	0.062	1.000	0.853	0.574	0.979	0.958	0.056	0.670
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Turb (NTU)	Coefficiente de Correlação	-0.373	0.527	0.409	0.358	-0.336	-0.255	1.000	0.227	0.755**	0.700*	0.309	-0.065	0.727*	0.627*	0.809**	0.773**	0.173	0.164	0.536
	Significância	0.259	0.096	0.212	0.280	0.312	0.450		0.502	0.007	0.016	0.355	0.848	0.011	0.039	0.003	0.005	0.612	0.631	0.089
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
HCO ₃ (mg/L)	Coefficiente de Correlação	-0.245	0.345	0.509	0.471	-0.418	-0.236	0.500	1.000	0.473	0.473	-0.382	0.411	0.655*	0.564	0.491	0.600	-0.327	0.555	-0.091
	Significância	0.467	0.298	0.110	0.144	0.201	0.484	0.117		0.142	0.142	0.247	0.209	0.029	0.071	0.125	0.051	0.326	0.077	0.790
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Cl (mg/L)	Coefficiente de Correlação	-0.205	-0.328	0.743**	0.779**	-0.159	0.278	-0.018	0.433	1.000	0.591	0.209	0.140	0.836**	0.927**	0.718*	0.836**	-0.018	0.400	0.318
	Significância	0.545	0.325	0.009	0.005	0.640	0.408	0.958	0.184		0.056	0.537	0.681	0.001	0.000	0.013	0.001	0.958	0.223	0.340
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
SO ₄ (mg/L)	Coefficiente de Correlação	-0.560	-0.141	0.893**	0.861**	-0.082	0.374	0.305	0.538	0.644*	1.000	0.245	0.524	0.782**	0.518	0.936**	0.755**	0.273	0.464	0.527
	Significância	0.073	0.679	0.000	0.001	0.811	0.258	0.361	0.088	0.033		0.467	0.098	0.004	0.102	0.000	0.007	0.417	0.151	0.096
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
NO ₃ (mg/L)	Coefficiente de Correlação	-0.218	-0.536	0.518	0.452	0.482	0.755**	-0.036	-0.273	0.141	0.492	1.000	0.037	0.327	0.209	0.355	0.255	-0.036	-0.264	0.255
	Significância	0.519	0.089	0.102	0.163	0.133	0.007	0.915	0.417	0.679	0.124		0.913	0.326	0.537	0.285	0.450	0.915	0.433	0.450
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
PO ₄ (µg/L)	Coefficiente de Correlação	-0.232	-0.287	0.306	0.177	0.185	0.565	-0.139	0.167	0.097	0.487	0.500	1.000	0.393	0.159	0.365	0.365	-0.047	0.683*	0.346
	Significância	0.493	0.392	0.361	0.602	0.586	0.070	0.684	0.624	0.776	0.128	0.117		0.232	0.641	0.270	0.270	0.891	0.021	0.297
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Ca (mg/L)	Coefficiente de Correlação	-0.327	-0.045	0.945**	0.942**	-0.209	0.364	0.518	0.664*	0.683*	0.893**	0.382	0.306	1.000	0.845**	0.891**	0.945**	-0.100	0.464	0.382
	Significância	0.326	0.894	0.000	0.000	0.537	0.272	0.102	0.026	0.020	0.000	0.247	0.361		0.001	0.000	0.770	0.151	0.247	
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Na (mg/L)	Coefficiente de Correlação	-0.236	-0.191	0.809**	0.786**	0.073	0.245	0.027	0.509	0.888**	0.688*	0.264	0.148	0.691*	1.000	0.682*	0.736**	-0.182	0.318	0.200
	Significância	0.484	0.574	0.003	0.004	0.832	0.467	0.937	0.110	0.000	0.019	0.433	0.664	0.019		0.021	0.010	0.593	0.340	0.555
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Mg (mg/L)	Coefficiente de Correlação	-0.482	-0.018	0.900**	0.895**	-0.045	0.264	0.427	0.600	0.651*	0.943**	0.409	0.389	0.936**	0.645**	1.000	0.855**	0.209	0.300	0.555
	Significância	0.133	0.958	0.000	0.000	0.894	0.433	0.190	0.051	0.030	0.000	0.212	0.237	0.000	0.032		0.001	0.537	0.370	0.077
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
K (mg/L)	Coefficiente de Correlação	-0.409	-0.345	0.800**	0.800**	-0.391	0.445	0.382	0.482	0.592	0.847**	0.473	0.269	0.873**	0.545	0.800**	1.000	-0.009	0.518	0.482
	Significância	0.212	0.298	0.003	0.003	0.235	0.170	0.247	0.133	0.055	0.001	0.142	0.425	0.000	0.083	0.003		0.979	0.102	0.133
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Al (mg/L)	Coefficiente de Correlação	0.073	-0.364	-0.336	-0.344	0.418	0.018	-0.364	-0.273	-0.405	-0.241	0.327	0.019	-0.336	-0.236	-0.264	-0.118	1.000	-0.100	0.518
	Significância	0.832	0.272	0.312	0.301	0.201	0.958	0.272	0.417	0.216	0.474	0.326	0.957	0.312	0.484	0.433	0.729		0.770	0.102
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Fe (mg/L)	Coefficiente de Correlação	-0.545	-0.236	0.109	0.108	-0.355	-0.082	-0.227	0.145	0.506	0.310	-0.218	0.139	0.064	0.373	0.145	0.155	-0.427	1.000	0.300
	Significância	0.083	0.484	0.750	0.751	0.285	0.811	0.502	0.670	0.113	0.354	0.519	0.684	0.853	0.259	0.670	0.650	0.190		0.370
	Número de amostras	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Mn (mg/L)	Coefficiente de Correlação	-0.364	0.127	0.600	0.669*	0.118	0.100	0.236	0.182	0.360	0.715*	0.327	0.102	0.600	0.309	0.773**	0.527	-0.191	0.064	1.000
	Significância	0.272	0.709	0.051	0.024	0.729	0.770	0.484	0.593	0.277	0.013	0.326	0.766	0.051	0.355	0.005	0.096	0.574	0.853	

Para a BhF a correlação mais significativa, superior a 0.90 e 99 % de probabilidade de certeza, ocorre em ambas as campanhas unicamente entre a condutividade elétrica específica e a salinidade. Existe uma relação de ordem de grandeza semelhante entre o cálcio e a condutividade elétrica específica e a salinidade, que evidencia a influência de carbonatos na mineralização de algumas das águas, também corroborado pela correlação alta (0.88 e 0.87, respectivamente, em 2011 e 2012) entre o magnésio e a condutividade elétrica específica.

5.6 - Isótopo radioativo do hidrogénio (trítio)

O trítio (^3H) é o isótopo radioativo do hidrogénio com massa três e que tem um tempo de semi-vida de 12.32 anos (Lucas & Unterweger, 2000). Pequenas quantidades deste isótopo podem ser produzidas na litosfera por irradiação de neutrões de ^6Li , mas é na atmosfera que a sua presença é mais significativa, decorrendo de uma origem natural ou artificial (antrópica). A produção natural verifica-se nas altas camadas da atmosfera (estratosfera) a uma taxa relativamente constante e ocorre por reação entre neutrões térmicos, resultantes da interação de raios cósmicos com partículas aí existentes, e os núcleos de átomos de azoto (^{14}N); quanto à origem antrópica está relacionada com a indústria nuclear e as detonações termonucleares que libertaram quantidades significativas de trítio na atmosfera, tendo como consequência a presença de elevadas concentrações deste isótopo na precipitação, a partir de 1952/53. A Figura 5.78 representa em esquema a origem e distribuição do trítio.

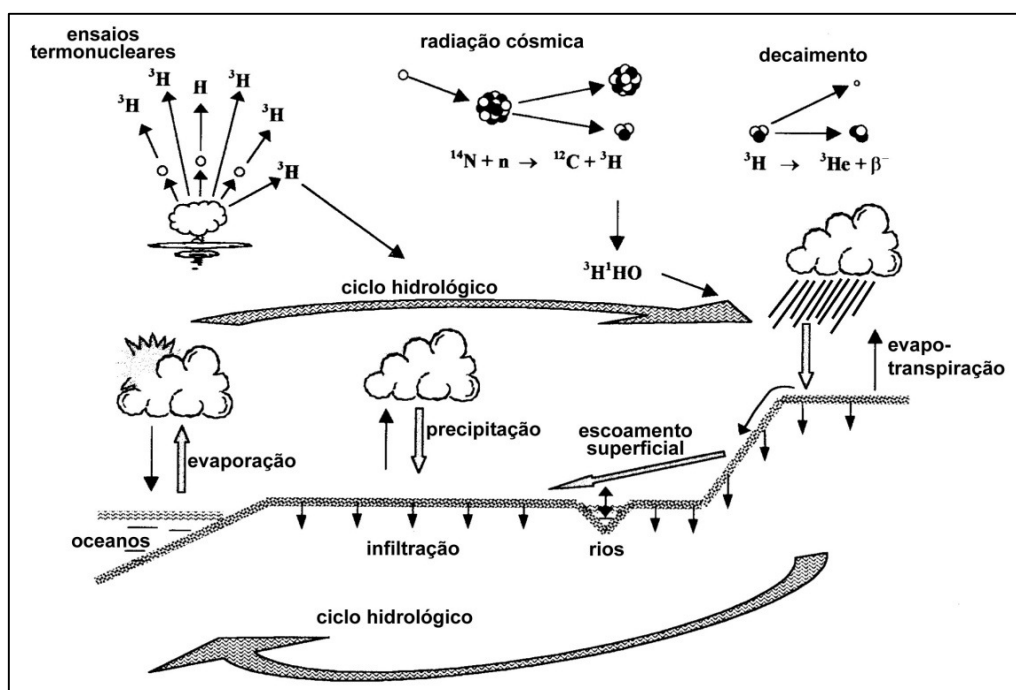


Figura 5.78 - Esquema da origem e distribuição do trítio (adaptado de Mook, 2000).

Michel (2007) salienta que antes dos testes nucleares as concentrações de trítio na precipitação eram da ordem de poucos TU, passando posteriormente a alguns milhares de TU (TU é a unidade de medida do trítio e corresponde ao quociente de 1 átomo de trítio por 10^{18}

átomos de hidrogénio, ou seja a 7.2 dpm (desintegrações por minuto) por litro de água, ou 0.12 Bq/L (IAEA, 1983)). Estas concentrações revelam forte dependência da latitude, da estação do ano e da proximidade à costa (Gat *et al.*, 1962; Libby, 1962; Eriksson, 1965; Clark & Fritz, 1997; Gat *et al.*, 2001; Michel, 2007; Ferronsky & Polyakov, 2012). A Figura 5.79 representa valores de trítio medidos na precipitação em duas cidades, Ottawa, Canadá, hemisfério norte e Pretória, África do Sul, hemisfério sul, onde é evidente, para ambos os locais, o acréscimo substancial deste isótopo até ao máximo registado em 1963 e também os menores valores em Pretória resultantes da predominância no hemisfério norte dos testes de armamento e do lento transporte inter-hemisférico (Gat *et al.*, 2001).

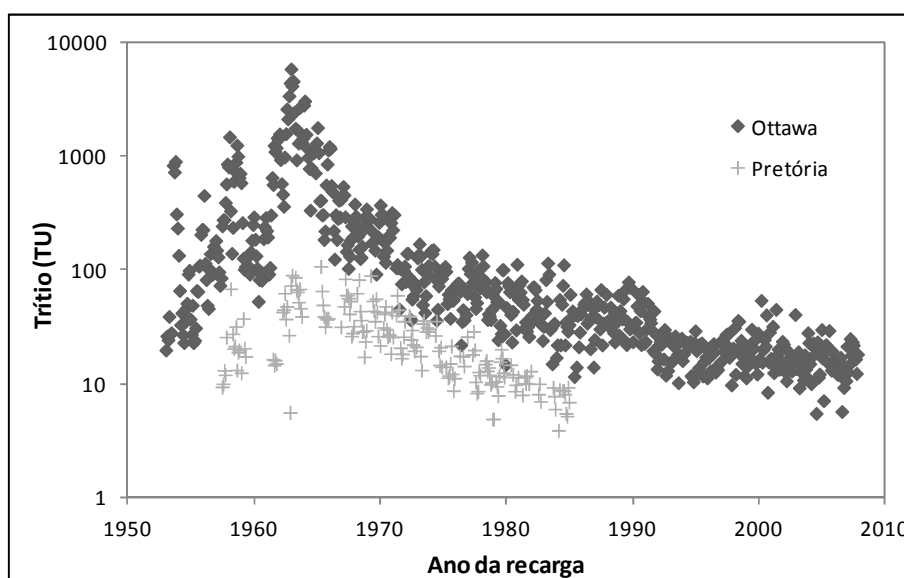


Figura 5.79 - Concentração do trítio na precipitação em locais representativos do hemisfério norte e sul (dados disponíveis em IAEA/WMO, 2013).

Relativamente a Portugal, os dados de trítio disponíveis no Global Network of Isotopes in Precipitation – GNIP (IAEA/WMO, 2013) são do período compreendido entre novembro de 1978 e dezembro de 2000, estando as estações localizadas em Bragança, Vila Real, Porto, Penhas Douradas, Portalegre, Beja e Faro (Tabela 5.43). A Tabela 5.44 apresenta os parâmetros estatísticos das estações portuguesas, com referência ao número de medidas consideradas respetivamente em cada caso e a indicação da data em que ocorreram os valores extremos, máximo e mínimo.

No geral, a comparação das concentrações medidas na mesma data revela que são relativamente semelhantes entre estações, verificando-se que em Faro os valores são menores que os das restantes estações localizadas mais para o interior, o que denota a tendência comum de evolução do parâmetro (Michel, 2007). Denota-se a exceção para o máximo medido em 1996, que poderá estar associado a algum fenómeno localizado (Figura 5.80). Em todo o caso, os registos em Portugal são muito inferiores aos de Ottawa e mais semelhantes aos de Pretória.

Tabela 5.43 - Parâmetros das estações de medição de trítio, em Portugal (informação disponível em IAEA/WMO, 2013).

Estação	Latitude (°N)	Longitude (°W)	Altitude (m)	Período dos dados
Bragança	41.800000	-6.733333	690	Mai-88 a Abr-91
Vila Real	41.316667	-7.733333	481	Mai-88 a Abr-91
Porto	41.133333	-8.600000	93	Mai-88 a Nov-99
Penhas Douradas	40.416667	-7.550000	1380	Mai-88 a Mai-99
Portalegre	39.283333	-7.416667	597	Mai-88 a Dez-99
Beja	38.016667	-7.866667	246	Mai-88 a Set-91
Faro	37.010000	-7.960000	9	Nov-78 a Dez-00

Tabela 5.44 - Dados estatísticos das concentrações de trítio (TU) medidas nas estações em Portugal (informação disponível em IAEA/WMO, 2013).

Estação	Parâmetro estatístico			Data		Nº de medidas
	Média (μ)	Valor Máximo (MAX)	Valor Mínimo (MIN)	MAX	MIN	
Bragança	9.1	19.1	2.7	15-06-1988	15-11-1990	34
Vila Real	7.0	17.6	2.8	15-06-1988	15-01-1991	28
Porto	4.9	17.8	1.7	15-06-1988	15-11-1999	98
Penhas Douradas	5.7	17.1	1.5	15-06-1988	15-12-1989	110
Portalegre	5.6	16.6	1.1	15-06-1988	15-01-1995	105
Beja	6.1	15.4	2.4	15-06-1988	15-01-1990	27
Faro	7.3	52.6	1.9	15-05-1996	15-11-1996	123

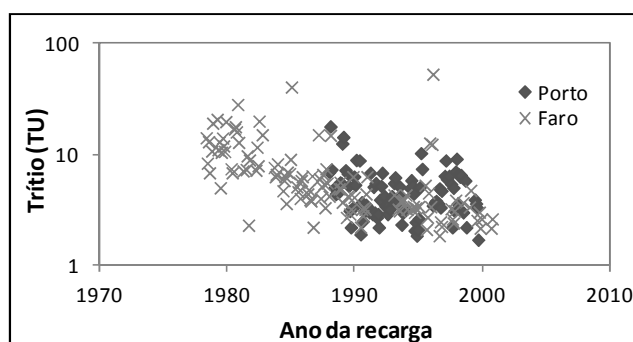


Figura 5.80 - Concentração do trítio na precipitação em duas estações de Portugal (dados disponíveis em IAEA/WMO, 2013).

Ferronsky & Polyakov (2012) referem que a maior parte do trítio, cerca de 93 %, permanece na hidrosfera e apenas 7 % na atmosfera. Tanto o trítio antropogénico como o natural entram no ciclo hidrológico através da precipitação e a sua presença na água subterrânea constitui uma evidência da recarga ativa (Clark & Fritz, 1997).

Como o hidrogénio não participa em reações significativas com minerais, a sua concentração é apenas afetada pelo decaimento radioativo, tratando-se do único radioisótopo que poderá fazer a datação de uma água de forma direta (Morais, 2012), no entanto, Carle *et al.* (2010)

defendem que usar isoladamente os resultados do trítio trará algumas incertezas devido à variação espacial e temporal na recarga inicial do trítio, mas também indicam que a concentração de trítio nas águas subterrâneas é função do ano de recarga, do tempo de residência na zona vadosa e da idade da água subterrânea. Michel (2007) salienta que o uso mais importante do trítio como ferramenta hidrológica é o estudo dos tempos de residência para águas superficiais e subterrâneas, e que apesar de sozinho não dar uma estimativa precisa da idade, as suas concentrações podem impor limites nas possíveis escalas de tempo para os processos hidrológicos em estudo.

A presença de concentrações de trítio pode ser útil no reconhecimento de águas posteriores aos testes nucleares (água pós-bomba) ou que, pelo menos, contém uma fração desta água (Plummer, 2007). Kaufman & Libby (1954) foram dos primeiros a reconhecer este potencial de datação da água subterrânea através do trítio e Hoffman & Stewart (1966) sustentam que, em alguns estudos hidrológicos, o trítio é superior a outros traçadores da água devido ao facto de ser diretamente incorporado na molécula da água.

O termo “idade da água subterrânea” é usado para referir o tempo decorrido desde a recarga, e a datação é relativa a um soluto ou gás dissolvido ou isótopo com origem na atmosfera e que foi transportado através da zona não saturada para e através do aquífero até ao ponto de amostragem (Plummer, 2007). Este autor também salienta que a idade da água subterrânea é “modelo-dependente”, e que se baseia na interpretação do mecanismo de recarga, das condições de fluxo da água subterrânea e outros processos físicos e químicos que podem ter afetado as concentrações medidas na amostra.

Carle *et al.* (2010) indicam que as amostras de água de poços são sempre uma mistura de moléculas de água com uma distribuição de idades que pode abranger um amplo intervalo, e a idade da água subterrânea é a idade média da amostra mista, sendo a idade apenas relativa à porção da água que contém o trítio mensurável. A mesma opinião é partilhada por Sanford (2011) que salienta que em qualquer parcela da água subterrânea a dispersão hidrodinâmica (mistura) combina sempre moléculas com idades individuais desconhecidas, obtendo-se uma idade aparente, a partir da interpretação das concentrações de traçador, relativa à média de idade das moléculas.

Na Tabela 5.45 apresenta-se uma interpretação qualitativa da recarga, para regiões continentais, com base em valores de trítio proposta por Clark & Fritz (1997), onde é visível a correspondência entre baixos valores de trítio e longos tempos de residência da água subterrânea.

Marques *et al.* (2012) referem que a ausência de ^3H numa amostra de água subterrânea é um bom indicador de que a infiltração terá ocorrido anteriormente a 1950, tendo por base a concentração em trítio na atmosfera (entre 3 a 5 TU), nas águas de precipitação em Portugal Continental (Carreira *et al.*, 2005).

Tabela 5.45 - Interpretação qualitativa da concentração em trítio (^3H) das águas em regiões continentais (adaptado de Clark & Fritz, 1997).

Teor em ^3H (TU)	Interpretação qualitativa
< 0.8	Submoderna (recarga antes de 1952)
0.8 a \approx 4	Mistura entre recarga submoderna e recente
5 a 15	Moderna (< 5 a 10 anos)
15 a 30	Presença de trítio de "bomba"
> 30	Considerável componente da recarga de 1960 a 1970
> 50	Recarga predominantemente nos anos 60

A quantificação da idade da água subterrânea através da utilização dos dados de trítio pode ser feita com a determinação do tempo (t) em anos função do tempo de semi-vida ($t_{1/2}$) do isótopo, da sua atividade inicial (a_o) quando o sistema ficou isolado de qualquer fonte potencial do isótopo, ou seja a concentração de ^3H na precipitação, e da sua atividade residual (a_t) num tempo t correspondente ao trítio medido na amostra da água subterrânea. A equação [5.7] traduz esta relação e resulta da apresentada por Clark & Fritz (1997).

$$t = \frac{t_{1/2}}{0.693} \ln \frac{a_o}{a_t} \quad [5.7]$$

Carle *et al.* (2010) referem a possibilidade de utilizar a idade da água subterrânea para relacionar com a vulnerabilidade, uma vez que as águas mais jovens sofreram transporte mais rápido a partir da superfície e têm maior probabilidade de ter interceptado contaminantes, resultantes da atividade humana nos últimos 100 anos, ao contrário das águas mais antigas, que terão estado isoladas e protegidas dessas atividades contaminantes omnipresentes em ambientes modernos. Hiscock (2005) salienta a mesma aplicação para o trítio na forma de traçador das entradas para o aquífero de poluentes modernos, como nitratos agrícolas e lixiviados de aterros.

5.6.1 - Amostragem, método analítico e discussão de resultados

Em Ferverença e Montouro procedeu-se à amostragem das respetivas nascentes e de mais um poço em cada bacia hidrográfica, num total de quatro pontos de água amostrados (F00, F16, M00 e M14). No caso da nascente de Montouro a recolha foi executada no interior do poço no local onde a água flui (Figura 5.6 (b)), relativamente à exsurgência Olhos da Ferverença a colheita foi feita através do furo, que esteve em bombagem pelo menos 15 minutos antes da amostragem (Figura 5.7), conforme indicação do laboratório responsável pela análise, e, no que diz respeito aos poços, foram selecionados aqueles que têm utilização permanente e diária.

Utilizaram-se frascos em polietileno de alta densidade (PEAD), com tampa dupla e capacidade de 500 mL, os quais foram totalmente cheios, evitando a presença de bolhas de ar, e conservados à temperatura ambiente.

O laboratório responsável pela determinação do teor em trítio foi o Laboratório de Datação por Trítio, do Instituto Tecnológico e Nuclear (ITN), através de enriquecimento eletrolítico seguido

de espectrometria de cintilação líquida (IAEA, 1976) usando o equipamento Packard Tri-Carb 2000 CA/LL. O erro associado às medições depende do teor em trítio na amostra (Galego Fernandes *et al.*, 2007; Carreira *et al.*, 2011b), variando em cerca de 0.3 TU para as determinações efetuadas. Na Tabela 5.46 apresentam-se os resultados obtidos e o erro analítico associado.

Tabela 5.46 - Resultados da concentração em trítio (^3H) das águas amostradas.

Pontos de água	Data da colheita	Teor em ^3H (TU)
F00	25-Jun-13	1.1 ± 0.3
F16	25-Jun-13	2.4 ± 0.3
M00	25-Jun-13	1.0 ± 0.3
M14	25-Jun-13	2.0 ± 0.3

A amostra F16 tem o valor mais alto revelando ser entre todas a água mais recente e em oposição M00 com o valor mais baixo será a mais antiga. Os valores obtidos para as amostras variam entre 1.0 ± 0.3 a 2.4 ± 0.3 TU, situam-se no intervalo de 0.8 a 4 TU, incluindo as águas no mesmo campo de datação qualitativa, ou seja, podemos extrapolar a existência de mistura de água submoderna com recente (Tabela 5.45), não permitindo uma distinção clara entre as diferentes águas analisadas. No entanto, é possível identificar dois “subgrupos”, um relativo às águas mais recentes ou jovens (M14 e F16) e de circulação menos profunda que contribuem para os valores mais elevados de trítio, e outro relativo às águas mais antigas (M00 e F00), de tempo de residência mais prolongado e menores teores de trítio.

Comparando apenas os resultados em cada bacia hidrográfica vemos que F00, com menor teor de ^3H , é mais antiga que F16 indicativo da maior circulação da água proveniente do Sistema aquífero Cársico da Bairrada (capítulo 4) por comparação com a circulação no aquífero mais superficial Quaternário/Cretácico; e que igualmente M00 é mais antiga que M14, distinguindo entre a circulação no aquífero mais profundo (Sistema aquífero Cretácico de Aveiro além da ligação a formações evaporíticas em profundidade) do aquífero freático superficial. Esta relação verificada entre as idades e os aquíferos também é salientada por Yechieli & Sivan (2011) ao indicar que, de um modo geral, a água subterrânea em aquíferos inferiores é suposto ter idades mais antigas.

Os valores medidos nas águas, especialmente nas nascentes, são da mesma ordem de grandeza dos registados em outras águas minerais portuguesas, nomeadamente Melgaço (Carreira *et al.*, 2011a) e Caldas da Rainha (Marques *et al.*, 2012), e inferiores à média das concentrações de ^3H nas águas de precipitação em Portugal, atualmente no valor de 3 a 5 TU, como anteriormente referido.

A avaliação da idade das águas amostradas, pela aplicação da equação [5.7] e considerando o teor de ^3H na precipitação de 5 TU, revelou para a água da nascente de Montouro uma idade situada entre 24 e 35 anos, de 23 a 33 anos para a água da exurgência de Olhos da Fervença, de 11 a 15 anos para a água do poço F16 e de 14 a 19 anos para a do poço M14 (Tabela 5.47).

Tabela 5.47 - Estimativa da idade das águas amostradas função da concentração em trítio (^3H).

Pontos de água	Teor em ^3H (TU)	t_{MIN} (anos)	t (anos)	$t_{\text{MÁX}}$ (anos)
F00	1.1 ± 0.3	23	27	33
F16	2.4 ± 0.3	11	13	15
M00	1.0 ± 0.3	24	29	35
M14	2.0 ± 0.3	14	16	19

Nas áreas em estudo desenvolvem-se atividades agrícolas que em alguns casos potenciam a contaminação das águas como anteriormente referido. Fez-se a representação dos teores de nitrato e sulfato versus o conteúdo de trítio (Figura 5.81), e constata-se que os teores mais elevados de NO_3 não se verificam em F00 e M00, reforçando a ausência de contaminação destas águas. M14 com um valor algo significativo de SO_4 remete para a existência de uma possível fonte de contaminação; quanto a M00, com menor ^3H indicia uma água com maior circulação, e o valor mais elevado de SO_4 reflete a interação água-rocha com formações evaporíticas, mencionada anteriormente; F00 e F16 não evidenciam o efeito deste ião uma vez que, mesmo para o menor tempo de residência de F16, o valor de SO_4 é baixo.

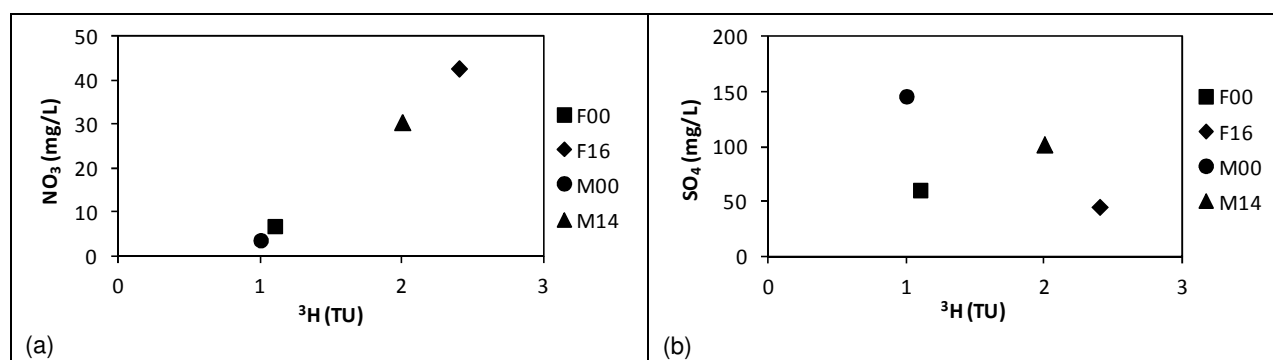


Figura 5.81 - Diagrama nitrato versus trítio (a) e sulfato versus trítio (b).

Na Figura 5.82 está a representação dos valores de trítio face à altitude elipsoidal e à condutividade elétrica específica. Apesar das pequenas diferenças altimétricas entre os pontos amostrados verifica-se que, em cada bacia hidrográfica, com o aumento da altitude elipsoidal há um aumento de ^3H .

Como se pode constatar, ao valor mais elevado de SEC de M00 corresponde o mais baixo valor de trítio, como à partida seria de esperar, o que é indicador de uma mais longa circulação e maior interação água-rocha (Carreira *et al.*, 2011b). Estes autores, assim como Albu *et al.* (1997) e Marques *et al.* (2012) salientam que valores de ^3H são geralmente baixos, exceto nos casos onde ocorrem processos de mistura com águas mais superficiais.

Clark & Fritz (1997) referem que na água subterrânea existente em profundidade em ambientes de bacias sedimentares com alta salinidade, resultante da interação água-rocha ao longo de grandes escalas de tempo, quando o trítio mensurável está acima de 1 TU significa que existe uma ligação hidráulica com a superfície e, muitas vezes, as águas são submodernas ou

paleoáguas, mas que tiveram mistura com águas modernas na zona de descarga (caso de nascentes) ou no interior de poços/furos. Este poderá ser o caso de M00, cujo resultado está nesse limite (1 ± 0.3). Por lapso, em Correia *et al.* (2014a) o valor indicado é de 2 ± 0.3 .

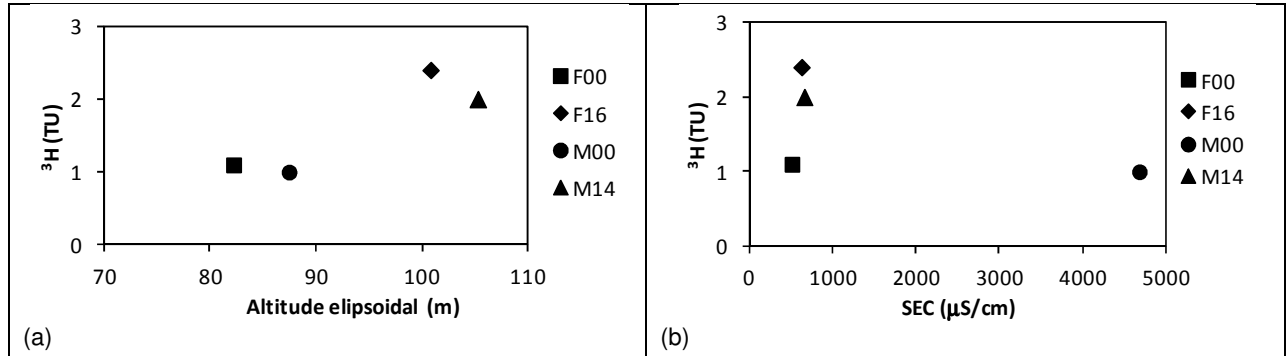


Figura 5.82 - Concentração do trítio versus altitude elipsoidal (a) e trítio versus condutividade elétrica específica (b).

Em síntese, podemos indicar que as águas das exsurgências são as mais antigas, com maiores tempos de circulação desde a recarga, e idades máximas determinadas de 33 e 35 anos, respetivamente para a água de Olhos da Fervença e de Montouro.

Capítulo 6 - Vulnerabilidade, perigosidade e risco

O termo vulnerabilidade começou por ser introduzido por Margat (1968) ao referir que a vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição é função dum conjunto de fatores que agem de forma diferente de acordo com o tipo de poluição, e na sua tentativa de definir esses fatores concebendo-os como possíveis bases duma cartografia de classificação resultante da combinação de diversas zonalidades. Albinet & Margat (1970; 1971) indicam que a vulnerabilidade do aquífero corresponde à possibilidade de percolação e difusão de contaminantes da superfície do solo para reservatórios naturais de água, em condições naturais. Estes autores evidenciaram que a proteção fornecida pelo ambiente natural varia de lugar para lugar, promovendo a representação em mapa do grau de vulnerabilidade das águas subterrâneas aos contaminantes como função das condições hidrogeológicas (Albinet, 1970).

Desde então muitos autores, nomeadamente Haertlé (1983), Aller *et al.* (1987) e Foster & Hirata (1988), usaram o termo vulnerabilidade e, apesar de este ser referente à suscetibilidade do aquífero relativamente à contaminação antropogénica, os contextos são diferentes, como, por exemplo, a definição apresentada por Hashimoto *et al.* (1982) no âmbito da avaliação do desempenho do sistema ou a de Villumsen *et al.* (1983), citado em Zaporozec (1994), que relaciona com o risco de substâncias químicas influenciarem a qualidade das águas subterrâneas ou a de Foster (1987) baseada no risco de contaminação de águas subterrâneas, que considera a vulnerabilidade do aquífero à contaminação como o conjunto de características intrínsecas dos estratos entre o aquífero e a superfície do solo, determinantes da suscetibilidade de sofrer os efeitos adversos de uma carga contaminante aplicada na superfície.

Zaporozec (1994) e Almeida *et al.* (2000a) consideram que a vulnerabilidade é uma propriedade intrínseca de um sistema de águas subterrâneas que depende da sensibilidade/suscetibilidade desse sistema a impactes antropogénicos e/ou naturais. Zaporozec (1994) distingue entre vulnerabilidade intrínseca (ou natural), que é definida exclusivamente como função de fatores hidrogeológicos (características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas do aquífero e do solo sobrejacente), e vulnerabilidade específica (ou integrada), que inclui potenciais impactes humanos, associados ao uso do solo e ao tipo de contaminante, que podem ser prejudiciais, no espaço e no tempo, à atual e futura utilização do recurso hídrico. A Figura 6.1 ilustra de forma simples a distinção entre estes dois conceitos (vulnerabilidade intrínseca e específica).

Daly & Warren (1998) apresentam a definição para vulnerabilidade como representando as características geológicas e hidrogeológicas que determinam a facilidade com que a água subterrânea pode ser contaminada pelas atividades humanas.

Em Portugal, Lobo-Ferreira & Cabral (1991) propuseram que o conceito vulnerabilidade associado à poluição de águas subterrâneas fosse definido como a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero, na sequência das conclusões da conferência internacional “Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants” (Matthess, 1987).

Vrba & Zaporozec (1994) salientam que a vulnerabilidade das águas subterrâneas é uma propriedade relativa, não mensurável e adimensional, em que a precisão da sua avaliação depende sobretudo da quantidade e qualidade de dados representativos e fidedignos. A

avaliação da vulnerabilidade nem sempre é uma tarefa fácil e a simplificação excessiva ou a descrição inadequada do sistema hidrogeológico ou as dificuldades na obtenção de dados de campo fiáveis, pode constituir uma séria limitação na qualidade dos mapas de vulnerabilidade (Stigter *et al.*, 2006), no entanto, Foster (2007) defende que, apesar das simplificações envolvidas, os mapas de vulnerabilidade dos aquíferos à poluição são ferramentas valiosas. Lobo-Ferreira (1998) refere que o mapeamento específico de vulnerabilidade é do ponto de vista científico mais consistente, no entanto, em geral, o número de dados disponível não é suficiente para a elaboração do mapeamento específico.

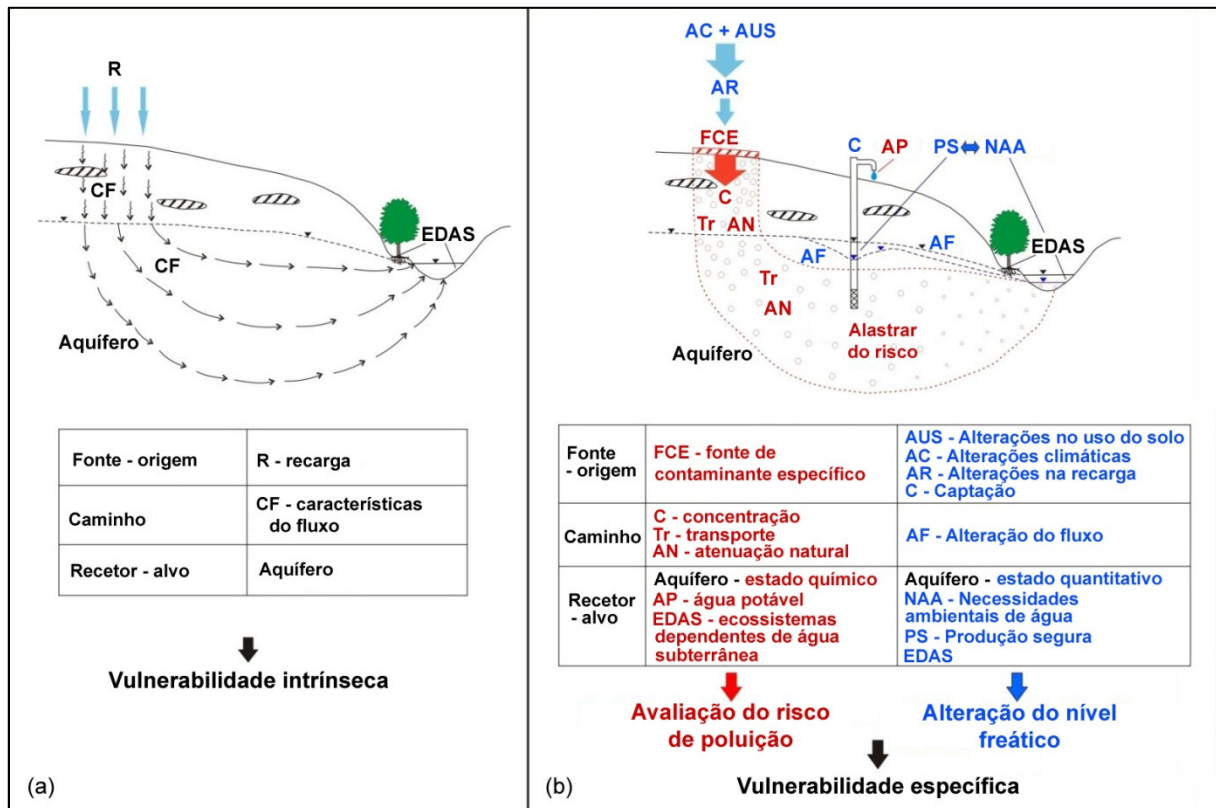


Figura 6.1 - Conceitos básicos que definem a vulnerabilidade intrínseca (a) e específica (b) (adaptado de Filippini *et al.*, 2013).

Um conceito associado à vulnerabilidade, mas distinto, é o risco, que segundo Paralta (2009) pode ser definido como a probabilidade de ocorrência de determinado cenário de contaminação acima de valores limites pré-estabelecidos, tomando em conta a vulnerabilidade da área estudada. Zwahlen *et al.* (2004) referem que o termo risco é usado para definir a probabilidade de uma determinada consequência adversa.

O risco de poluição depende não só da vulnerabilidade mas também da existência de cargas poluentes significativas que possam entrar no ambiente subterrâneo, sendo causado não apenas pelas características intrínsecas do aquífero, muito estáveis, mas também pela existência de atividades poluentes, fator dinâmico que, em princípio, pode ser controlado (Lobo-Ferreira *et al.*, 1995a; LNEC, 2002). Zwahlen *et al.* (2004) acrescentam que o risco também depende da probabilidade dos eventos poluentes se desenvolverem e das consequências para a água subterrânea.

Daly *et al.* (2004) indicam que, considerando o modelo “origem-caminho-alvo”, o risco de contaminação da água subterrânea depende de três elementos: o perigo de uma atividade potencialmente poluente (equivalente à origem), a vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea à contaminação (equivalente ao caminho) e as potenciais consequências de um evento de contaminação (o alvo é a água subterrânea).

Neste contexto, o perigo é definido como uma fonte potencial de contaminação resultante de atividades humanas que ocorrem, principalmente, à superfície (De Ketelaere *et al.*, 2004). Na Tabela 6.1 apresenta-se referência a algumas fontes de poluição, pontuais e difusas, das águas subterrâneas.

Tabela 6.1 - Fontes de poluição da água subterrânea (adaptado de Notenboom *et al.*, 1994).

Tipo de poluente	Tipo de fonte	Fonte
Metais pesados	Difusa	Fertilizante químico e natural (estruume) Deposição atmosférica Sistemas de esgotos Pesticidas com metais Vias de comunicação (estradas, caminhos-de-ferro,...)
	Pontual	Áreas urbanas, Zonas industriais Aterros Cemitérios Minas e escombrelras abandonadas
Pesticidas	Difusa	Agricultura e deposição atmosférica
Orgânicos naturais e de origem artificial	Difusa	Deposição atmosférica
	Pontual	Áreas urbanas, Zonas industriais Aterros Cemitérios Escombrelras de minas Fugas de tanques de contenção de líquidos
Fertilizantes (azoto e fósforo)	Difusa	Agricultura e infiltração de águas poluídas

Em síntese, o risco é o resultado da interação entre vários componentes: perigo ou perigosidade, vulnerabilidade intrínseca, exposição, mitigação. Como tal, Foster (1987) refere que um aquífero com elevado índice de vulnerabilidade pode não apresentar risco de poluição, caso não exista carga contaminante significativa ou ter alto risco de poluição apesar de baixo índice de vulnerabilidade (Figura 6.2).

A avaliação do risco constitui um processo sistemático de avaliação para estimar o impacto potencial de um agente químico, biológico ou físico na água subterrânea. A avaliação do risco ou análise do risco identifica os riscos, existentes ou potenciais, e as vias de exposição da contaminação, de modo a proporcionar uma base para a tomada de medidas que garanta a proteção da água subterrânea (Daly *et al.*, 2004). Estes autores salientam que a análise do risco deve ser realizada em duas fases: a avaliação da intensidade do risco e a avaliação da

sensibilidade ao risco. Ambos são componentes essenciais para uma avaliação global do risco, que constitui a base para uma gestão sustentável do risco (Tabela 6.2).

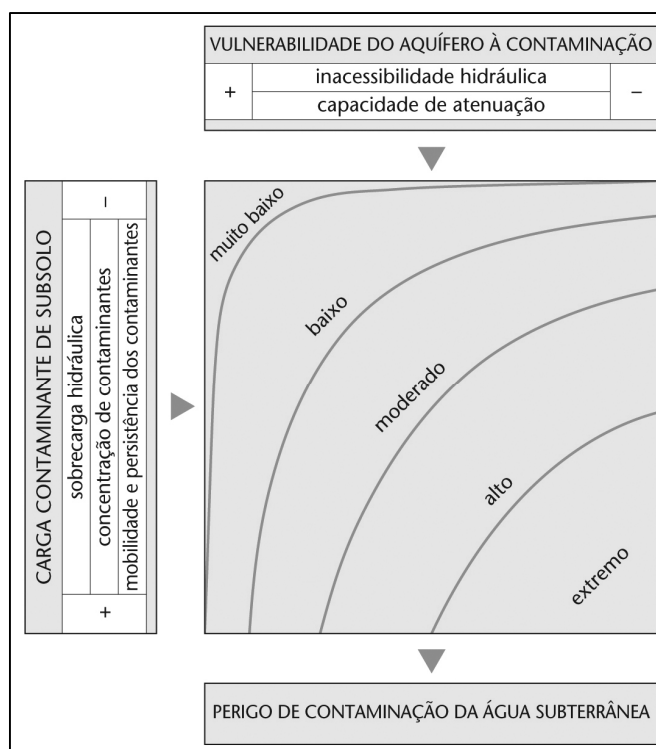


Figura 6.2 - Esquema conceptual para avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea (Foster *et al.*, 2006).

Tabela 6.2 - Avaliação do risco: questões principais da avaliação da intensidade do risco, da avaliação da sensibilidade do risco e da gestão do risco (adaptado de Daly *et al.*, 2004).

<p><i>O que pode correr mal?</i> Identificação dos perigos e das consequências</p> <p><i>Qual a probabilidade de correr mal?</i> Estimativa da probabilidade destas consequências</p> <p><i>Até que ponto pode o impacto perigoso atingir o alvo?</i> Estimativa da possibilidade de redução do impacto (ou estimativa da vulnerabilidade)</p>	Avaliação da intensidade do risco
<p><i>O que pode acontecer ao alvo se algo correr mal?</i> Avaliação da sensibilidade do alvo versus o impacto (análise da consequência)</p> <p><i>O risco é aceitável e pode ser reduzido?</i> Avaliação do dano considerando o valor ambiental e económico</p>	Avaliação da sensibilidade ao risco
AVALIAÇÃO GLOBAL DO RISCO	
<p>Que decisões resultam da avaliação do risco?</p> <p>Que medidas de controlo são necessárias para minimizar o risco?</p>	Gestão do risco

As cartas de risco ou cartas de risco global constituem uma forma, espacial, de sintetizar os resultados da avaliação global do risco, que integram todos os aspetos do procedimento de avaliação. São a conjugação das cartas de intensidade do risco (que englobam a combinação das cartas de perigosidade e de vulnerabilidade) e das cartas de sensibilidade do risco (retratam a sensibilidade da água subterrânea contra um certo impacto considerando o valor económico e ecológico do recurso).

A gestão do risco baseia-se na análise e no cruzamento de informação diversa, como, por exemplo, o uso do solo, a carga contaminante no subsolo e a vulnerabilidade do aquífero, de modo a alcançar uma resposta ao risco que integre a avaliação e seleção de um conjunto de opções, bem como a implementação de medidas para prevenir, ou minimizar, a probabilidade de um evento de contaminação e as suas consequências, caso este venha a ocorrer. Isto inclui, por exemplo, uma gestão de utilização do solo que restrinja as intervenções às zonas de menor risco, uma política de construção que leve em consideração a vulnerabilidade e o valor da água subterrânea, e a implementação de redes de monitorização e de práticas operacionais especiais (Daly *et al.*, 2004).

De seguida, apresentam-se alguns dos métodos mais utilizados na avaliação da vulnerabilidade, o mapeamento da vulnerabilidade intrínseca nas áreas em estudo, a identificação de elementos de perigosidade nas áreas em estudo e consequentes implicações no risco potencial para o recurso hídrico, bem como a elaboração de cartas de risco. Propõem-se, igualmente, algumas medidas de minimização do risco, adequadas à realidade das áreas em estudo.

6.1 - Métodos de avaliação da vulnerabilidade

Em simultâneo com a tendência de formalizar a definição de vulnerabilidade, ocorreram várias tentativas de desenvolver sistemas de avaliação e de mapeamento da vulnerabilidade, nomeadamente, DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), GOD (Foster, 1987; Foster & Hirata, 1988), SINTACS (Civita, 1994b), AVI (Van Stempvoort *et al.*, 1992; 1993), entre outros.

Muitos dos métodos iniciais não consideram as características especiais dos sistemas cársicos, que são particularmente vulneráveis à contaminação, uma vez que devido aos finos solos, à concentração do fluxo na zona cársica e aos pontos de recarga através de orifícios, os contaminantes podem facilmente chegar à água subterrânea e rapidamente ser transportados ao longo de grandes distâncias através das condutas carsificadas (Andreo *et al.*, 2006). Entretanto, métodos específicos foram sendo desenvolvidos, como, por exemplo, EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1998), COP (Vías *et al.*, 2004; 2006) e PaPRIKa (Huneau *et al.*, 2013).

Alguns dos métodos incluem índices de vulnerabilidade obtidos através de parâmetros hidrogeológicos, morfológicos e outras formas de parametrização das características dos aquíferos, de um modo bem definido, que possibilita o seu mapeamento. A vantagem é que os métodos fornecem algoritmos ou árvores de decisão relativamente simples e são apropriados para usar com os sistemas de informação geográfica (Majandang & Sarapirome, 2013).

No entanto, mais recentemente, autores como Yu *et al.* (2010) referem que o sistema de índice corresponde a uma aproximação grosseira, sendo necessários estudos quantitativos sobre esses indicadores de vulnerabilidade, e apresentam no seu trabalho uma abordagem com simulação de transporte e uma tentativa de fornecer validação ou melhoria dos sistemas de

índice. Abordagem semelhante está implementada no trabalho de Eberts *et al.* (2012), com avaliação de vulnerabilidade em termos de tempos médios de percurso ou distribuição de tempos de percurso da água.

Genericamente, o pressuposto a todos estes métodos é que os contaminantes são transportados para o nível freático por recarga, logo, áreas com maior taxa de recarga são mais vulneráveis do que as de menor taxa de recarga (Healy, 2010), no entanto, não existe um padrão universalmente aceite pelo qual a vulnerabilidade do aquífero seja estimada.

Afonso *et al.* (2010) salientam que a maioria dos métodos de avaliação da vulnerabilidade consideram meios homogêneos e isotrópicos, e que a uma escala regional a simplificação do ambiente geológico permite avaliar a vulnerabilidade dos sistemas aquíferos, no entanto, a uma escala local a variabilidade dos parâmetros pode limitar a utilidade dos métodos.

6.1.1 - Método DRASTIC

O método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) tem aplicação na avaliação da vulnerabilidade intrínseca e resulta da ponderação de sete índices hidrogeológicos, nomeadamente: Profundidade do nível freático (D - *Depth to water*); Recarga do aquífero (R - *Net Recharge*); Material do aquífero (A - *Aquifer media*); Tipo de solo (S - *Soil Media*); Topografia (T - *Topography, slope*); Impacto da zona não saturada (I - *Impact of the vadose zone media*) e Condutividade hidráulica do aquífero (C - *Conductivity hydraulic of the aquifer*). A sigla do método advém das iniciais destes parâmetros, em inglês.

A cada um destes parâmetros atribuem-se valores de 1 a 10, os quais estão relacionados com as condições locais, sendo valores mais elevados correspondentes a maior vulnerabilidade, e pesos de 1 a 5 de acordo com a sua importância relativa na quantificação da vulnerabilidade, com parâmetros mais importantes a apresentarem maior peso. Existem duas gamas de pesos relativos ou fatores de ponderação, uma de aplicação geral e outra específica para pesticidas. Na Tabela 6.3 consta a síntese destes elementos e na Figura 6.3 a representação esquemática dos parâmetros.

O índice DRASTIC (ID) é obtido através da soma dos produtos dos pesos (w) pelos valores (r) de cada parâmetro de acordo com a equação [6.1] estabelecida por Aller *et al.* (1987).

$$ID = D_r \times D_w + R_r \times R_w + A_r \times A_w + S_r \times S_w + T_r \times T_w + I_r \times I_w + C_r \times C_w \quad [6.1]$$

Os valores do índice DRASTIC distribuem-se por oito classes e variam entre 23 e 226, sendo tanto maior a vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas quanto maior for o ID. Na Tabela 6.4 apresenta-se estas classes e a correspondência em termos qualitativos de vulnerabilidade.

No caso do índice DRASTIC pesticidas o intervalo de valores é variável entre um mínimo de 26 e um máximo de 256.

Tabela 6.3 - Parâmetros, classes, valores e pesos do método DRASTIC (adaptado de Aller *et al.*, 1987).

Parâmetro	Classes	Valor (r)	Peso (w)	
			Normal	Pesticidas
D Profundidade do nível freático (m)	0 - 1.5	10	5	5
	1.5 - 4.6	9		
	4.6 - 9.1	7		
	9.1 - 15.2	5		
	15.2 - 22.9	3		
	22.9 - 30.5	2		
	> 30.5	1		
R Recarga (mm/ano)	0 - 51	1	4	4
	51 - 102	3		
	102 - 178	6		
	178 - 254	8		
	> 254	9		
A Material do aquífero	Xisto argiloso, argilito	1 - 3 (2*)	3	3
	Rocha metamórfica e ígnea	2 - 5 (3*)		
	Rocha metamórfica e ígnea alterada/fraturada	3 - 5 (4*)		
	Arenito, calcário e argilito estratificados	5 - 9 (6*)		
	Arenito maciço	4 - 9 (6*)		
	Calcário maciço	4 - 9 (6*)		
	Areia e balastro	4 - 9 (8*)		
	Basalto	2 - 10 (9*)		
Calcário carsificado	9 - 10 (10*)			
S Tipo de solo	Fino ou ausente	10	2	5
	Conglomerado	10		
	Areia	9		
	Turfa	8		
	Argila agregada e/ou expansível	7		
	Franco arenoso	6		
	Franco	5		
	Franco siltoso	4		
	Franco argiloso	3		
	Lodo	2		
	Argila não agregada e não expansível	1		
T Topografia (%)	0 - 2	10	1	3
	2 - 6	9		
	6 - 12	5		
	12 - 18	3		
	> 18	1		
I Impacto da zona não saturada	Camada confinante	1	5	4
	Silte e argila	2 - 6 (3*)		
	Xisto argiloso, argilito	2 - 5 (3*)		
	Rocha metamórfica e ígnea	2 - 8 (4*)		
	Calcário	2 - 7 (6*)		
	Arenito	4 - 8 (6*)		
	Arenito, calcário e argilito estratificados	4 - 8 (6*)		
	Areia e conglomerados com quantidade significativa de silte e argila	4 - 8 (6*)		
	Areia e balastro	6 - 9 (8*)		
Basalto	2 - 10 (9*)			
Calcário carsificado	8 - 10 (10*)			
C Condutividade hidráulica do aquífero (m/dia)	< 4.1	1	3	2
	4.1 - 12.2	2		
	12.2 - 28.5	4		
	28.5 - 40.7	6		
	40.7 - 81.5	8		
	> 81.5	10		

* valor típico

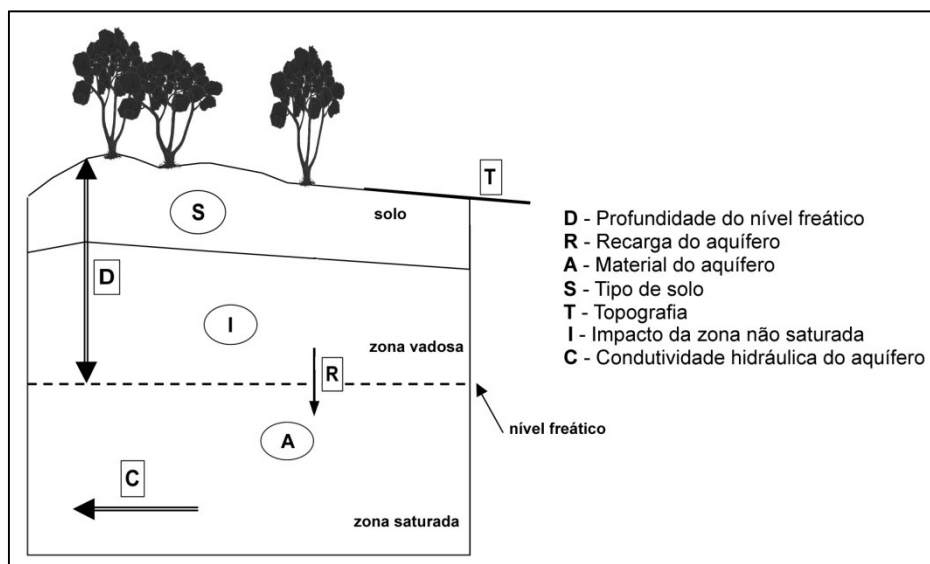


Figura 6.3 - Representação esquemática dos parâmetros do método DRASTIC (adaptado de LNEC, 2002).

Tabela 6.4 - Classes de vulnerabilidade do índice DRASTIC (adaptado de Aller *et al.*, 1987; Fraga *et al.*, 2013).

Classe	Insignificante	Baixa		Moderada		Alta		Extrema
ID	< 79	80 - 99	100 - 119	120 - 139	140 - 159	160 - 179	180 - 199	> 200

6.1.2 - Método GOD

O método GOD, desenvolvido por Foster (1987), para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos é um método simples e sistemático que considera os seguintes parâmetros: Ocorrência de água subterrânea (*Groundwater occurrence*), com identificação do tipo e grau de confinamento hidráulico da água subterrânea; Litologia das camadas superiores, identificando a classe global do aquífero em termos do grau de consolidação e das características litológicas (*Overall aquifer class in terms of grade of consolidation and lithological character*) e Profundidade do nível freático ou espessura ao teto do aquífero (*Depth to groundwater table or strike*).

A metodologia empírica para determinação deste índice advém de operações sequenciais, nomeadamente, identificação do parâmetro G e indexação na escala de 0.0 a 1.0, multiplicação pela pontuação do parâmetro O com escala entre 0.4 e 1.0 que por sua vez vai multiplicar pela classificação atribuída a D numa escala de 0.6 a 1.0, obtendo-se o valor do índice GOD, compreendido entre 0.0 e 1.0, que se subdivide em cinco classes de vulnerabilidade (Figura 6.4). Os autores Foster *et al.* (2006) salientam que o esquema apresenta algumas modificações em relação à versão original estabelecida em Foster & Hirata (1988).

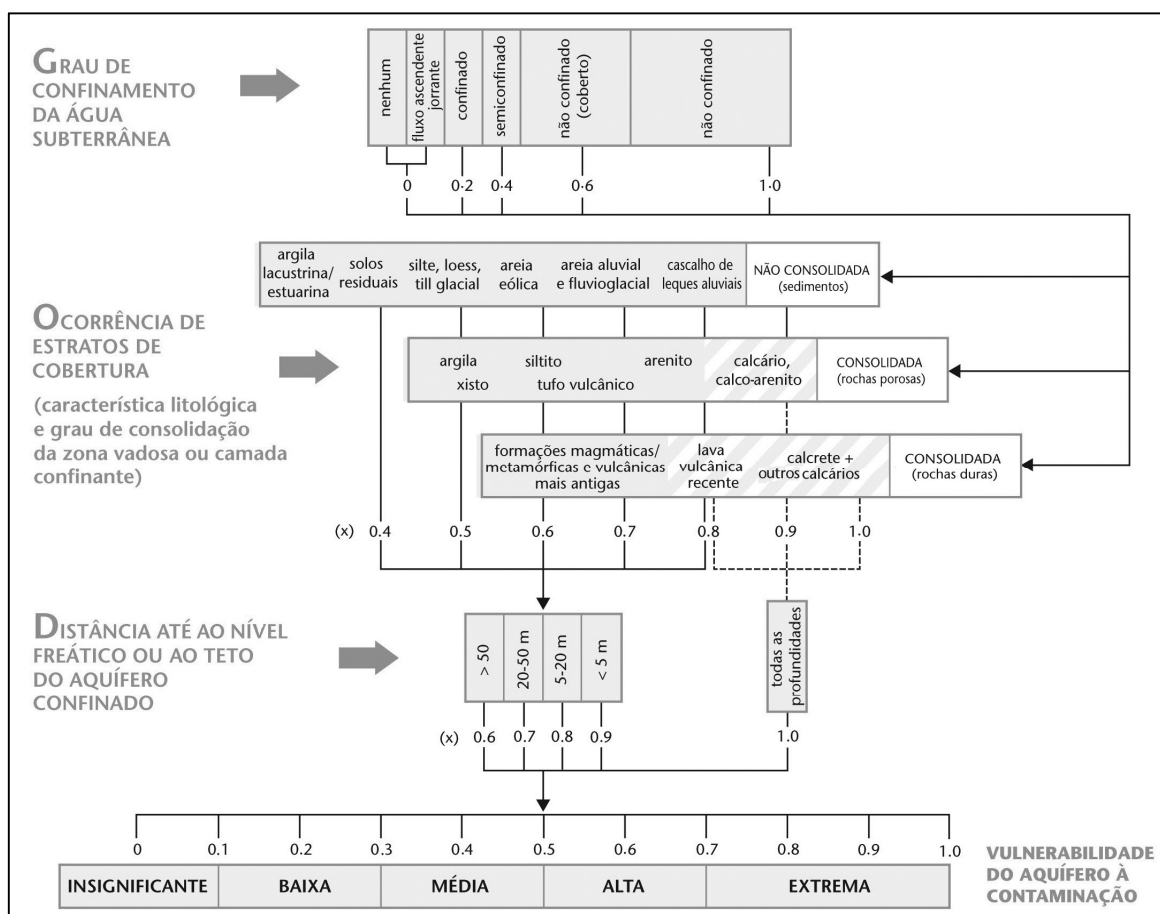


Figura 6.4 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação (Foster *et al.*, 2006).

6.1.3 - Método AVI

O método AVI (*Aquífer Vulnerability Index*), proposto por Van Stempvoort *et al.* (1992) estabelece a quantificação do índice de vulnerabilidade do aquífero baseado em dois parâmetros fundamentais: a espessura de cada camada acima do aquífero superior (d_i , em m) e a condutividade hidráulica estimada em cada camada (K_i , em m/d). Estes autores indicam que através destes parâmetros físicos é possível calcular um fator teórico designado resistência hidráulica (c , em anos), através da equação [6.2].

$$c = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{K_i} \quad [6.2]$$

A resistência hidráulica representa a resistência de um aquífero ao fluxo vertical (Kruseman & de Ridder, 1990), e corresponde ao tempo aproximado da passagem de um poluente por advecção através das diferentes camadas aquíferas.

A classificação do índice AVI e sua relação com a resistência hidráulica está sintetizada na Tabela 6.5, sendo possível constatar que quanto maior é a resistência hidráulica, menor é a vulnerabilidade.

Os valores c ou $\log(c)$ podem ser usados diretamente para gerar mapas de contornos de iso-resistência (Van Stempvoort *et al.*, 1992; 1993), contudo, neste método cada perfil (por exemplo, furo) está relacionado com um valor qualitativo de AVI (Tabela 6.5) permitindo elaborar cartas de iso-vulnerabilidade.

Tabela 6.5 - Classes de vulnerabilidade do índice AVI (adaptado de Van Stempvoort *et al.*, 1992).

Resistência hidráulica - c (anos)	$\log(c)$	Vulnerabilidade (AVI)
0 - 10	< 1	Extremamente alta
10 - 100	1 - 2	Alta
100 - 1000	2 - 3	Moderada
1000 - 10000	3 - 4	Baixa
> 10000	> 4	Extremamente baixa

6.1.4 - Método SINTACS

SINTACS é um método desenvolvido em Itália por Civita (1994b), para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos à contaminação. É semelhante ao método DRASTIC, utilizando os mesmos parâmetros com diferentes sistemas de ponderação dependentes da configuração hidrogeológica, e cujo acrónimo resulta da seguinte sequência paramétrica: **S** (*Soggiacenza*) – profundidade da água; **I** (*Infiltrazione*) – infiltração; **N** (*Non – saturo*) – espessura da zona não saturada ou impacto da zona vadosa; **T** (*Tipologia della copertura*) – tipo de solo; **A** (*Acquifero*) – características hidrogeológicas do aquífero; **C** (*Conducibilità idraulica dell'acquifero*) – condutividade hidráulica do aquífero e **S** (*Superficie topografica*) – declive. O método apresenta uma estrutura complexa, tanto para a entrada como para a saída de dados, necessitando de programas informáticos específicos (Auge, 2004), uma vez que como refere Vrba & Civita (1994), é um método paramétrico baseado num modelo de sistema de contagem de pontos (pcsm - point count system model), completamente computadorizado, sendo necessário recorrer à utilização de programas informáticos como SIG - Sistema de Informação Geográfica (Civita, 1994a).

Através de um conjunto de tabelas e gráficos, que podem ser consultados em vários trabalhos do autor (De Maio *et al.*, 2001; Civita & De Maio, 2004; Civita, 2010), cada parâmetro é convertido num valor (p) através de uma escala progressiva que varia entre 1 e 10, e posteriormente é multiplicado por uma sequência de pesos (w), que são usados em paralelo e não em série (Tabela 6.6), cada um descrevendo uma configuração hidrogeológica e de impacto que enfatiza a ação de cada parâmetro. Assim: impacto normal e impacto severo refletem a densidade da ocupação humana e da intensidade do uso do solo; drenagem é utilizada para descrever zonas que estão frequentemente inundadas ou pantanosos, em que existe uma infiltração a partir da rede de drenagem superficial; cársico e fissurado são usados em áreas profundamente carsificadas e fissuradas, respetivamente (Dunne, 2004). Ao longo dos anos foram sendo atualizadas as versões do método SINTACS, que na versão 5 (SINTACS R5) era caracterizado pela divisão do índice numérico em cinco graus de vulnerabilidade, o qual mais recentemente passou a seis com o acréscimo de “Nitratos”.

Tabela 6.6 - Sequência de pesos multiplicadores indicados para SINTACS (adaptado de Civita, 2010).

Parâmetro	Impacte Normal	Impacte Severo	Drenagem	Cársico	Fissurado	Nitratos
S	5	5	4	2	3	5
I	4	5	4	5	3	5
N	5	4	4	1	3	4
T	3	5	2	3	4	5
A	3	3	5	5	4	2
C	3	2	5	5	5	2
S	3	2	2	5	4	3

O índice de vulnerabilidade ($I_{SINTACS}$) é calculado para cada célula de uma rede de discretização que é sobreposto no mapa de base da área de estudo (De Maio *et al.*, 2001; Civita & De Maio, 2004), através da equação [6.3].

$$I_{SINTACS} = \sum_{j=1}^7 p_j w_j \quad [6.3]$$

Na Tabela 6.7 apresenta-se os intervalos de cada classe final de vulnerabilidade.

Tabela 6.7 - Classes de vulnerabilidade do índice SINTACS (adaptado de De Maio *et al.*, 2001).

Classe	Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Elevada	Extremamente elevada
$I_{SINTACS}$	26 - 80	80 - 105	105 - 140	140 - 186	186 - 210	210 - 260

6.1.5 - Método IS

O Índice de Suscetibilidade (IS) foi desenvolvido por Ribeiro (2000), citado em Ribeiro (2005), como um índice de vulnerabilidade específico, sendo uma adaptação do índice de vulnerabilidade intrínseco DRASTIC (Ribeiro, 2005). Este índice foi aplicado com o intuito de avaliar a vulnerabilidade do aquífero à poluição difusa agrícola, com um dos primeiros casos de estudo descrito em Francés *et al.* (2001).

A principal alteração no IS é o acréscimo de um parâmetro de ocupação do solo (LU), abandonando assim o conceito de um índice puramente intrínseco, baseado unicamente nas condições naturais (Stigter *et al.*, 2006), além de considerar apenas quatro dos sete parâmetros do método DRASTIC (D, R, A e T), com nova ponderação (Ribeiro, 2005). Na Tabela 6.8 apresentam-se os pesos atribuídos a cada parâmetro.

Tabela 6.8 - Parâmetros e fatores de ponderação do IS (Francés *et al.*, 2001; Ribeiro, 2005).

Parâmetro	D	R	A	T	LU
Ponderador	0.186	0.212	0.259	0.121	0.222

O parâmetro **D**, profundidade do nível freático, corresponde à distância vertical que um contaminante tem de percorrer para chegar à zona saturada, como tal, quanto maior for a profundidade maior é a probabilidade do contaminante sofrer atenuação. A recarga do aquífero, **R**, constitui *per si* um parâmetro que denota a existência de mecanismos de transporte vertical, de dispersão e de diluição dos contaminantes, sendo considerado que uma recarga elevada implica maior quantidade de contaminantes lixiviados para o aquífero. O material do aquífero, **A**, condiciona a mobilidade do contaminante e denota a capacidade de atenuação do aquífero. A topografia, **T**, distingue os locais de forte declive, com maior erosão e escorrência superficial, dos locais planos mais propícios à infiltração e percolação dos poluentes até à zona saturada. O parâmetro ocupação do solo (**LU**) diz respeito às atividades exercidas no terreno, que traduzem as potenciais fontes de contaminação, e tem por base as classes da carta CORINE Land Cover (IGP).

Os valores das classes de cada parâmetro estão sintetizados na Tabela 6.9 e na Tabela 6.10, com a indicação do valor típico do parâmetro A entre parênteses.

O valor final do IS, resultante da soma ponderada dos cinco parâmetros, varia entre 0 e 100, respetivamente, da mais baixa suscetibilidade para a mais alta, com correspondência para as classes de vulnerabilidade indicadas na Tabela 6.11.

Tabela 6.9 - Classes e valores dos parâmetros D, R, A e T (adaptado de Ribeiro, 2005; Paralta, 2009).

Parâmetro	Classes	Valor
D Profundidade do nível freático (m)	< 1.5	100
	1.5 - 4.6	90
	4.6 - 9.1	70
	9.1 - 15.2	50
	15.2 - 22.9	30
	22.9 - 30.5	20
	> 30.5	10
R Recarga do aquífero (mm/ano)	< 51	10
	51 - 102	30
	102 - 178	60
	178 - 254	80
	> 254	90
A Material do aquífero	Xisto argiloso, argilito	10-30 (20)
	Rocha metamórfica/ígnea	20-50 (30)
	Rocha metamórfica/ígnea alterada	30-50 (40)
	"Till" glacial	40-60 (50)
	Arenito, calcário e argilito estratificados	50-90 (60)
	Arenito maciço	40-90 (60)
	Calcário maciço	40-90 (80)
	Areia e balastro	40-90 (80)
	Basalto	20-100 (90)
Calcário carsificado	90-100 (100)	
T Topografia (%)	< 2	100
	2 - 6	90
	6 - 12	50
	12 - 18	30
	> 18	10

Tabela 6.10 - Classes e valores do parâmetro LU (adaptado de Ribeiro, 2005; Paralta, 2009).

Parâmetro	Classes	Valor
LU Ocupação do solo	Descargas industriais, zonas de espalhamento de lixos	100
	Perímetros regados, arrozais	90
	Pedreiras, zonas de extracção de areia, minas a céu aberto, estaleiros	80
	Aeroportos, zonas portuárias, infraestruturas da rede de auto-estradas e da rede ferroviária	75
	Espaços de actividades industriais, comerciais e de equipamentos gerais	75
	Espaços verdes urbanos	75
	Zonas com equipamentos desportivos e de ocupação de tempos livres	75
	Tecido urbano contínuo	75
	Tecido urbano descontínuo	70
	Culturas permanentes (vinhas, pomares, olivais)	70
	Culturas anuais associadas às culturas permanentes	50
	Pastagens	50
	Sistemas culturais e parcelares complexos	50
	Terras ocupadas principalmente por agricultura com espaços naturais importantes	50
	Territórios agro-florestais	50
	Meios aquáticos (sapais, salinas, etc.)	50
	Zonas descobertas sem ou com pouca vegetação (praias, dunas, zonas incendiadas recentemente, etc.)	0
	Florestas e meios semi-naturais, superfícies com água	0

Tabela 6.11 - Classes de vulnerabilidade do IS (Ribeiro, 2005).

Classe	Extremamente baixa	Muito baixa	Baixa	Moderada a baixa	Moderada a alta	Alta	Muito alta	Extremamente alta
IS	< 30	30 - 40	40 - 50	50 - 60	60 - 70	70 - 80	80 - 90	> 90

6.1.6 - Método EPIK

O método EPIK foi desenvolvido especificamente para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos cársicos, por Doerfliger & Zwahlen (1998). É baseado em propriedades intrínsecas do aquífero (geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas) não considerando parâmetros dependentes do tempo como, por exemplo, precipitação e recarga (Vías *et al.*, 2005).

O índice considera os seguintes quatro parâmetros: **E** (*Epikarst*) – intensidade da carsificação e permeabilidade; **P** (*Protective cover*) – material de cobertura do aquífero; **I** (*Infiltration conditions*) – condições de infiltração e **K** (*Karst network development*) – extensão da rede cársica.

De acordo com o impacte no potencial da poluição, cada parâmetro é classificado em intervalos (Tabela 6.12), sendo usados fatores ponderados para cada parâmetro por forma a equilibrar a sua importância.

Tabela 6.12 - Valores de cada parâmetro do índice EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1998).

Parâmetro	E1	E2	E3	P1	P2	P3	P4	I1	I2	I3	I4	K1	K2	K3
Valor	1	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

O fator protetor (F_p), designado por Doerfliger & Zwahlen (1998), é determinado com a equação [6.4], onde E_i , P_i , I_i e K_i correspondem aos valores de cada parâmetro. Os valores de F_p situam-se entre 9 e 34, sendo os mais baixos representativos de maior vulnerabilidade (Tabela 6.13).

$$F_p = 3E_i + 1P_i + 3I_i + 2K_i \quad [6.4]$$

Tabela 6.13 - Classes de vulnerabilidade do índice EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1998; Doerfliger et al., 1999).

Classe	Muito alta	Alta	Média	Baixa
F_p	9 - 19	20 - 25	> 25	> 25, com a presença de P4

6.1.7 - Método COP

Outro método de aplicação aos meios cársicos é o COP (Vías et al., 2004; 2006), cujo acrónimo advém das iniciais dos fatores usados: **C** (*flow Concentration*) – concentração do fluxo, **O** (*Overlying layers*) – camadas sobrejacentes e **P** (*Precipitation*) – precipitação. Na Figura 6.5 é possível visualizar como estes fatores são determinados e a ponderação de cada um deles para o cálculo do índice COP.

Vías et al. (2006) referem que a base conceptual do método, de acordo com a Abordagem Europeia (Daly et al., 2002; Goldscheider & Popescu, 2004), é avaliar a proteção natural da água subterrânea (fator O) determinada pelas propriedades do solo sobrejacente e pela zona não saturada, e também para estimar como esta proteção pode ser modificada pelo processo de infiltração - difusa ou concentrada - (fator C) e as condições climáticas (fator P - precipitação).

Os limites de intervalo para as classes muito alta e alta são atribuídos, principalmente, em função da influência do fator C, em rochas carbonatadas, e com menor influência do fator P. Os da classe muito baixa correspondem a zonas em que os fatores C e P têm pouca influência sobre a proteção. As classes moderada e baixa referem-se a zonas onde a proteção potencial é baixa a média, e em que os fatores C e P não têm uma influência decisiva sobre a vulnerabilidade.

Mais recentemente, em Vías et al. (2010) é apresentado um parâmetro de vulnerabilidade global (G_v), que tem como objetivo a comparação da importância das classes de vulnerabilidade em cada aquífero.

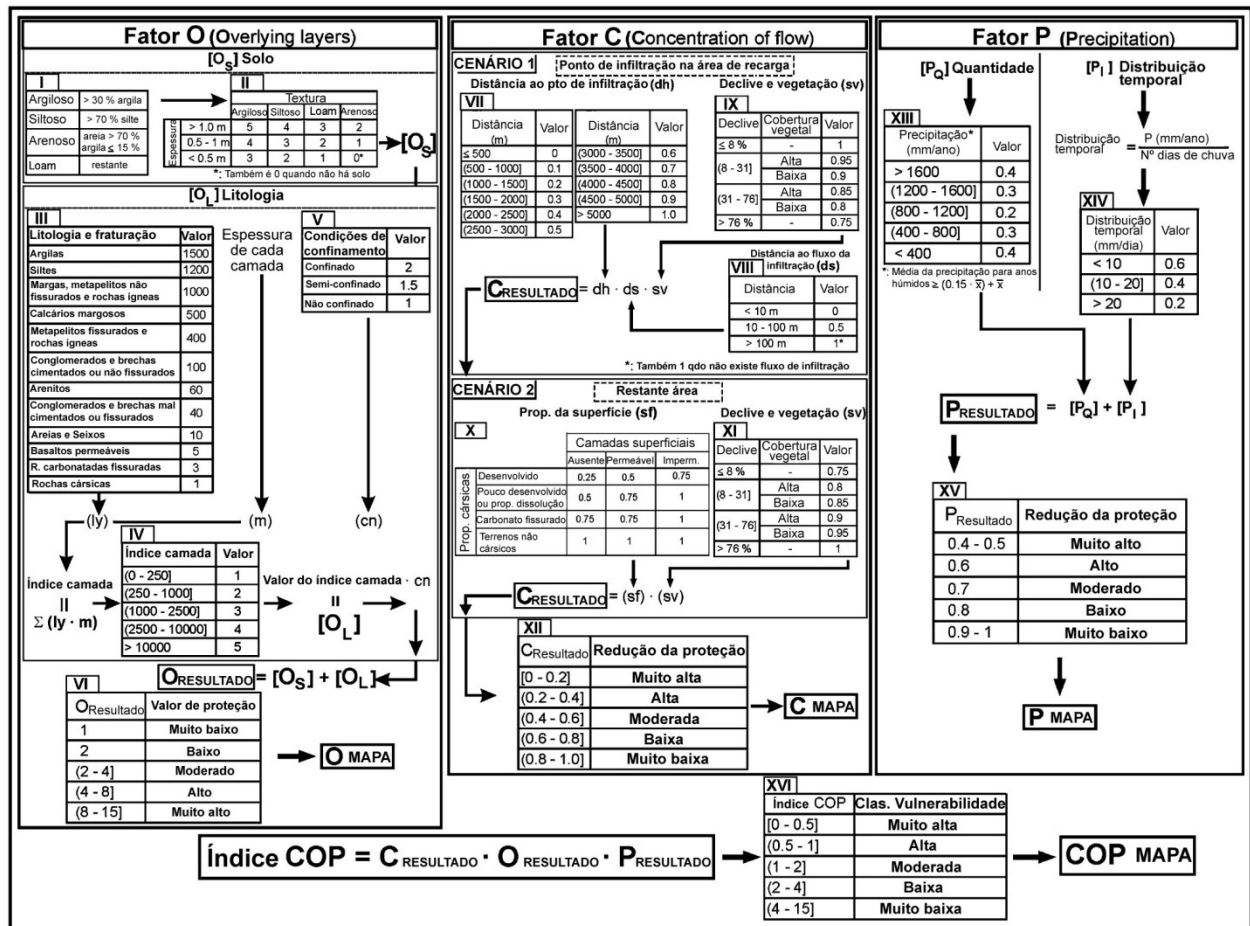


Figura 6.5 - Diagrama do método COP (adaptado de Vías *et al.*, 2004; 2006).

6.2 - Avaliação da vulnerabilidade nas áreas de estudo

Lobo-Ferreira *et al.* (1995a) apresentam a interpretação em termos de vulnerabilidade à poluição das formações aquíferas de Portugal Continental, designada de análise clássica e elaborada por Lobo-Ferreira & Oliveira (1993). A interpretação é feita com base nas características litológicas, sintetizadas em Rodrigues *et al.* (1989), e distingue quatro classes: V1 – vulnerabilidade muito grande; V2 – vulnerabilidade grande; V3 – vulnerabilidade muito variável e outros (Figura 6.6). A interpretação desta informação para as áreas em estudo, permite constatar que na bacia hidrográfica de Ferveça se está perante uma vulnerabilidade muito grande (V1) associada às rochas sedimentares carbonatadas, carsificadas e vulnerabilidade grande (V2) inerente às formações detríticas de cobertura, porosas; enquanto que na microbacia hidrográfica de Montouro se tem uma vulnerabilidade grande (V2) relacionada com as rochas sedimentares mesozóicas, porosas, e com as formações detríticas de cobertura, porosas (Figura 6.6).

A classificação da vulnerabilidade com base no modelo DRASTIC, foi aplicada em Portugal e à escala do país por Lobo-Ferreira & Oliveira (1993), sendo possível visualizar esse mapeamento na Figura 6.7. Extrapolando esta classificação para as áreas em estudo, verifica-se que ambas evidenciam dois intervalos de valores do índice DRASTIC, nomeadamente de 160 a 179 e de 180 a 199 (Figura 6.7), correspondentes a alta vulnerabilidade (Tabela 6.4).

A comparação da Figura 6.6 e Figura 6.7, permite indicar que em ambas as áreas de estudo se estima um elevado grau de vulnerabilidade.

Os mapas de vulnerabilidade apresentados para Portugal Continental possibilitaram uma primeira abordagem da avaliação deste parâmetro para a microbacia hidrográfica de Montouro e para a bacia hidrográfica de Ferveça, a uma escala menos pormenorizada.

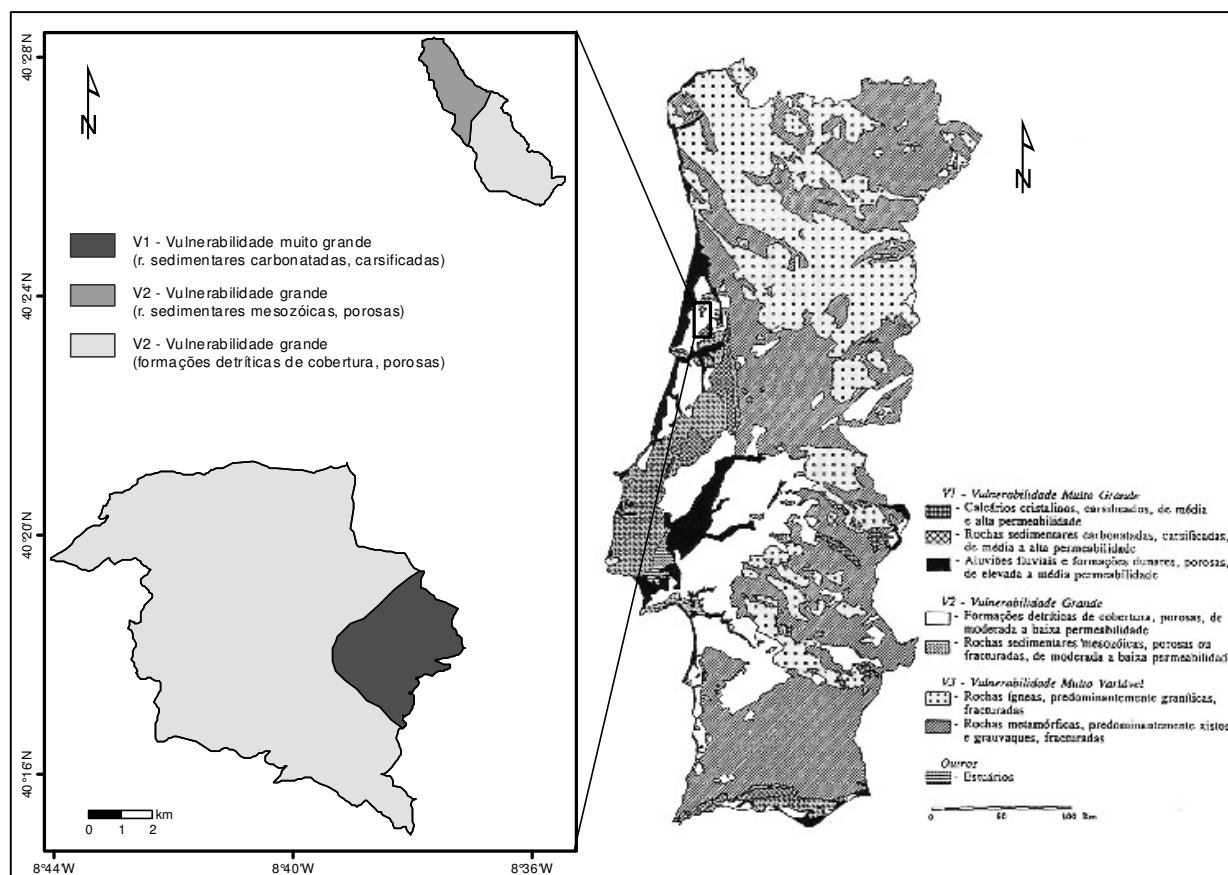


Figura 6.6 - Vulnerabilidade à poluição das formações aquíferas de Portugal Continental, através da análise clássica (adaptado de Lobo-Ferreira & Oliveira, 1993 in Lobo-Ferreira *et al.*, 1995), com aplicação às áreas de estudo.

A avaliação da vulnerabilidade na microbacia hidrográfica de Montouro e na bacia hidrográfica de Ferveça foi elaborada considerando as características e distribuição espacial dos sistemas aquíferos presentes em cada uma das áreas e que são responsáveis, ou têm influência, direta ou indiretamente, na água das nascentes de Montouro e de Olhos da Ferveça. A unidade cartografada (que pode ser o aquífero, o sistema aquífero, a formação geológica, etc.) é um conceito subjacente na aplicação, por exemplo, do método DRASTIC (Oliveira & Lobo-Ferreira, 1998).

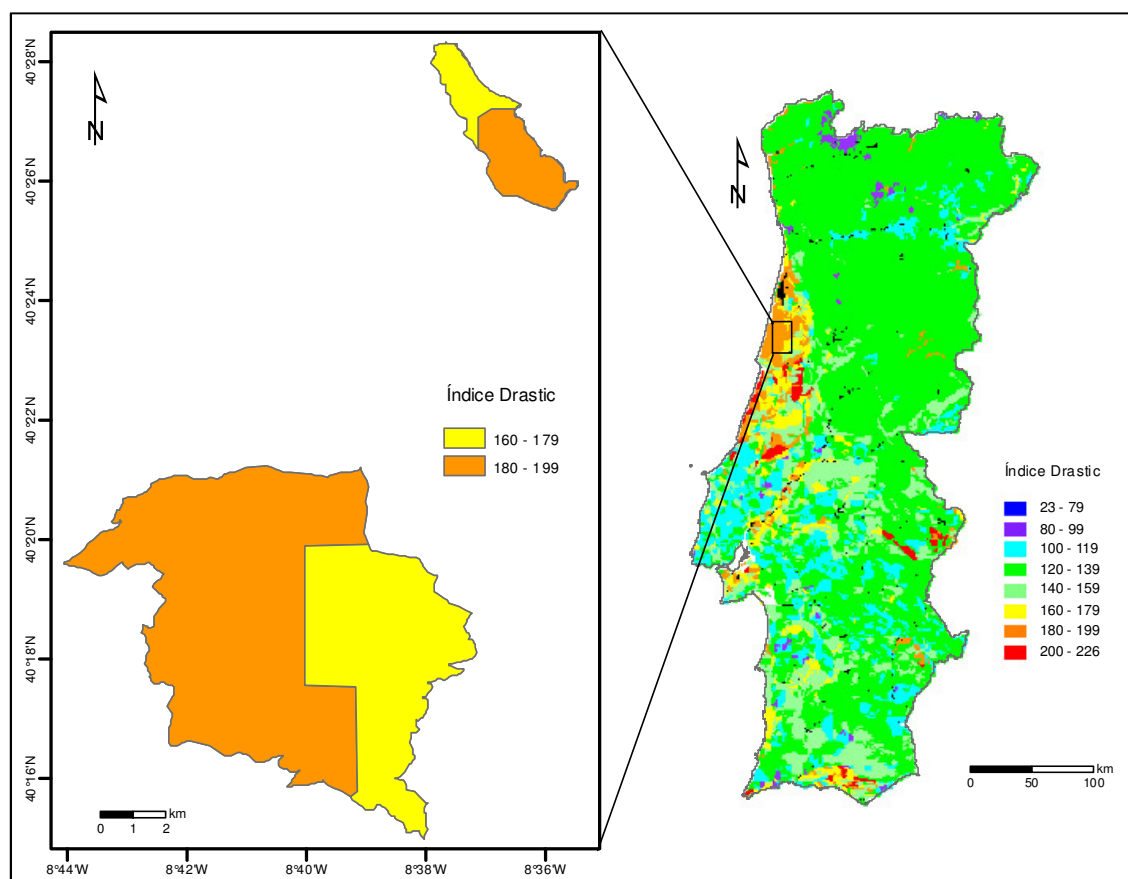


Figura 6.7 - Mapeamento da vulnerabilidade à poluição para Portugal Continental, pelo método DRASTIC (adaptado de Lobo-Ferreira & Oliveira, 1993 in Lobo-Ferreira, 1998), com aplicação às áreas de estudo.

A caracterização da vulnerabilidade nas áreas de estudo implicou a implementação de uma metodologia que consistiu em: i) seleção do tipo de dados, por forma a caracterizar os indicadores hidrogeológicos; ii) aquisição de dados, que englobou trabalho de campo, consulta de cartografia temática e de dados bibliográficos para obtenção de alguns parâmetros; iii) qualificação e quantificação dos indicadores hidrogeológicos com base no processamento analítico e gráfico dos dados; iv) reclassificação dos indicadores hidrogeológicos na forma de índices parcelares; e v) elaboração do mapa de vulnerabilidade final (Figura 6.8).

A abordagem incluiu a aplicação do método DRASTIC em ambas as áreas de estudo e do método COP para o aquífero cársico, tirando partido da utilização de uma cartografia baseada em SIG (Sistema de Informação Geográfica), que permite a compilação dos dados geoespaciais, com o mapeamento de cada parâmetro, possibilitando a posterior sobreposição e, finalmente, a obtenção do mapeamento da vulnerabilidade intrínseca (VI). Procedeu-se, igualmente, à análise e inclusão de um novo parâmetro na metodologia inicial DRASTIC, criando um modelo modificado designado DRASTIC-SA que foi aplicado em ambas as áreas de estudo. Realizou-se, simultaneamente, uma calibração destes métodos de avaliação da vulnerabilidade considerando a concentração de nitratos.

O processamento realizado em toda a cartografia, com o *software* ArcGIS (ESRI Inc., 2010), considerou na MhM um tamanho de célula de, cerca de, 14 m × 14 m e de, aproximadamente, 27 m × 27 m na BhF.

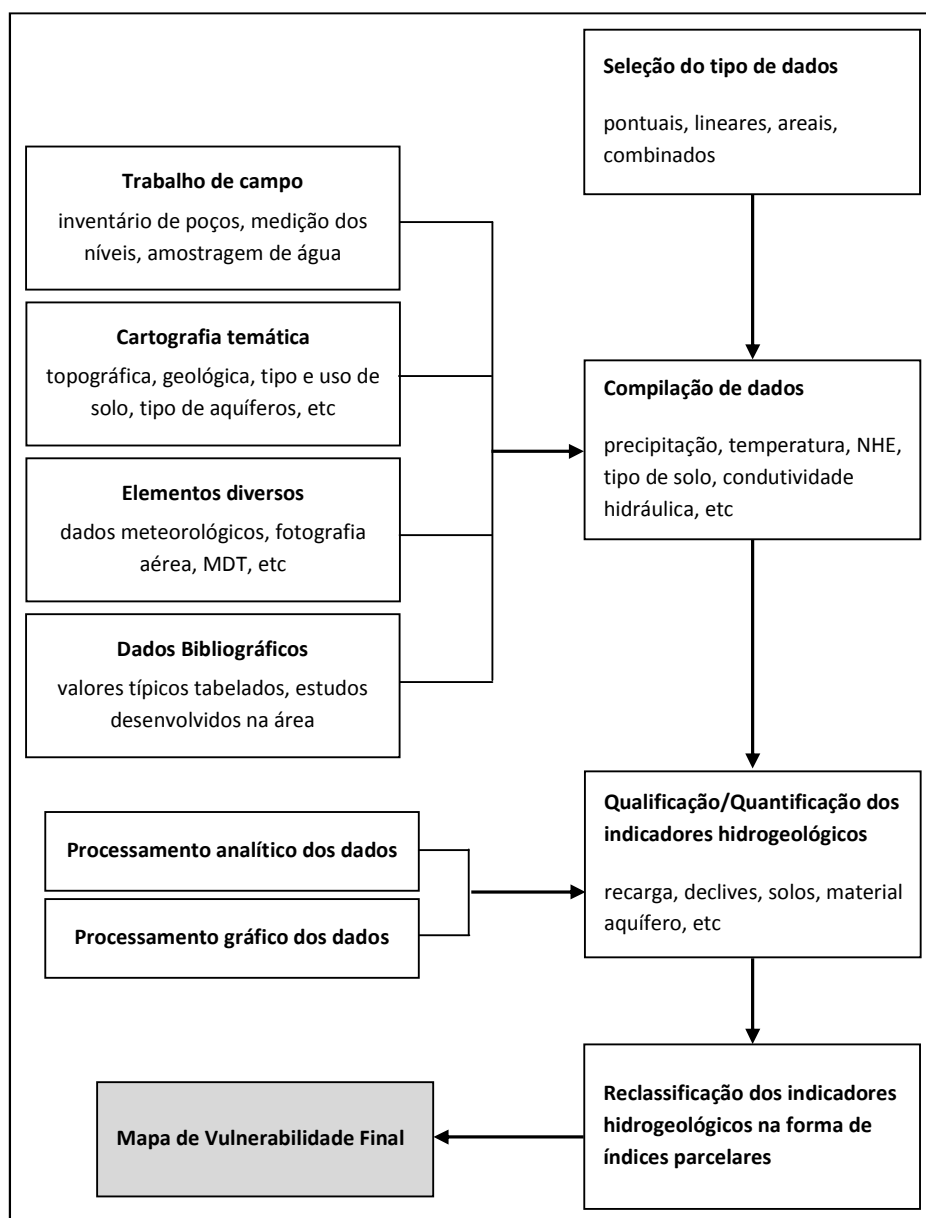


Figura 6.8 - Esquema geral da metodologia aplicada ao estudo da vulnerabilidade nas áreas de estudo.

6.2.1 - Vulnerabilidade na microbacia hidrográfica de Montouro

A quantificação da vulnerabilidade intrínseca na MhM pela metodologia DRASTIC implicou a determinação de cada parâmetro com base em informação recolhida, conhecida ou tabelada.

A profundidade do nível freático (parâmetro D) foi avaliada através da campanha de medição piezométrica no inverno de 2011 (subcapítulo 4.3.1). De entre as três campanhas de medição de níveis (inverno 2011, verão 2011 e inverno 2012), escolheu-se a realizada em primeiro lugar por ser a que apresenta níveis menos profundos e, conseqüentemente, representa maior vulnerabilidade.

A distribuição espacial da profundidade do nível freático pode ser visualizada na Figura 6.9 (a), verificando-se a predominância de níveis pouco profundos (< 1.5 m) em 94 % da área, com

classificação máxima do parâmetro (10), relativamente a cerca de 6 % com níveis freáticos até profundidades de 4.6 m (Tabela 6.14).

Tabela 6.14 - Valores do parâmetro D na microbacia hidrográfica de Montouro.

Profundidade do nível freático (m)	Valor Drastic	Área (km ²)	Área (%)
0 - 1.5	10	6.0	94.2
1.5 - 4.6	9	0.4	5.8
	Total	6.4	100.0

O parâmetro da recarga (R) foi calculado no subcapítulo 4.5, indicando uma estimativa de recarga média anual na microbacia hidrográfica de Montouro no valor de 170 mm (item 4.5.4). Considerando a geologia aflorante na área, nomeadamente o caso da formação Argilas de Vagos (C⁵) com baixa permeabilidade e efeito de camada confinante que promove uma redução significativa da recarga, optou-se, por isso, pela distinção e atribuição da menor classificação (1) comparativamente à restante área com classificação 6 (Tabela 6.15). Cerca de 89 % da área revela recarga correspondente ao valor 6 e, aproximadamente, 11 % de valor 1. A distribuição espacial está representada na Figura 6.9 (b).

Tabela 6.15 - Valores do parâmetro R na microbacia hidrográfica de Montouro.

Recarga (mm/ano)	Valor Drastic	Área (km ²)	Área (%)
0 - 51	1	0.7	10.7
102 - 178	6	5.7	89.3
	Total	6.4	100.0

Conjugando o conhecimento das características do material do aquífero (A), expostas no subcapítulo 4.1 e complementadas com a informação do subcapítulo 2.5, com as classes estipuladas pelo método DRASTIC, definiu-se o valor 6 para arenitos estratificados e 8 para areias (Tabela 6.3). O mapa com a representação espacial consta na Figura 6.9 (c), denotando uma distribuição equilibrada de ambas as classes, com aproximadamente 47 % de valor 6 e cerca de 53 % de valor 8 (Tabela 6.16).

Tabela 6.16 - Valores do parâmetro A na microbacia hidrográfica de Montouro.

Material do aquífero	Valor Drastic	Área (km ²)	Área (%)
Arenitos estratificados	6	3.0	46.9
Areias	8	3.4	53.1
	Total	6.4	100.0

A informação relativa ao tipo de solo na MhM, está compilada no subcapítulo 2.8, e serviu de base para a classificação do parâmetro S (tipo de solo). Aos cambissolos húmicos de textura franco arenosa atribuiu-se o valor 6, e aos podzóis órticos, desenvolvidos em formações detríticas, o valor 9. A Tabela 6.17 apresenta o resumo das áreas ocupadas por cada classe, sendo, cerca de, 45 % a de valor 6 e, aproximadamente, 55 % a de valor 9. No mapa da Figura 6.9 (d) é possível visualizar a ocupação de cada classe.

Tabela 6.17 - Valores do parâmetro S na microbacia hidrográfica de Montouro.

Tipo de solo	Valor Drastic	Área (km ²)	Área (%)
Franco arenoso	6	2.9	44.8
Areia	9	3.5	55.2
Total		6.4	100.0

A determinação do parâmetro T (topografia) necessita da quantificação dos declives na microbacia. Quanto menor é o declive mais propícia é a infiltração e, conseqüentemente, maior será o possível transporte de poluentes para o aquífero, tendo o parâmetro T uma classificação mais elevada. Os declives foram obtidos através do modelo digital do terreno, organizados em intervalos como estipulado na Tabela 6.3, e classificados com o respetivo valor. O mapa representativo deste parâmetro encontra-se na Figura 6.9 (e), e na Tabela 6.18 está a síntese dos resultados. Consta-se que apenas 3.4 % da área total tem declives até 2 % e classificação máxima (10), 15 % da área tem até 6 % de declive, com o declive superior a 6 % a perfazer 81.6 % da área e a evidenciar menor vulnerabilidade do aquífero em relação a este parâmetro (classes 5, 3 e 1).

Tabela 6.18 - Valores do parâmetro T na microbacia hidrográfica de Montouro.

Declive (%)	Valor Drastic	Área (km ²)	Área (%)
0 - 2	10	0.2	3.4
2 - 6	9	1.0	15.0
6 - 12	5	1.8	28.2
12 - 18	3	1.4	22.4
> 18	1	2.0	31.0
Total		6.4	100.0

A Figura 6.9 (f) apresenta o mapeamento da área considerando o parâmetro I (impacto da zona não saturada). Como anteriormente referido, as Argilas de Vagos (C⁵) comportam-se como camada confinante do aquífero e no local onde ocorrem foi atribuído o valor 1, nos restantes locais os valores considerados foram de 6 para os arenitos estratificados e 8 para a areia. O valor mais elevado ocupa, cerca de, 53 % da área, seguido de, aproximadamente, 36 % com valor 6 e verifica-se que, cerca de, 11 % da área é ocupada pela camada confinante (Tabela 6.19).

Tabela 6.19 - Valores do parâmetro I na microbacia hidrográfica de Montouro.

Impacto da zona não saturada	Valor Drastic	Área (km ²)	Área (%)
Camada confinante	1	0.7	10.8
Arenitos estratificados	6	2.3	36.3
Areia	8	3.4	53.0
Total		6.4	100.0

A avaliação do parâmetro da condutividade hidráulica do aquífero (C) resultou da conjugação de dados tabelados com base na litologia e de dados conhecidos sobre as formações aquíferas, referidos no subcapítulo 4.1.1. A área caracteriza-se por predomínio das formações com maior condutividade hidráulica com, aproximadamente, 52 %, seguida de, cerca de, 38 % da área com formações de mais baixa condutividade (< 4.1 m/dia) e, aproximadamente, 10 % na classe intermédia (Tabela 6.20). A Figura 6.9 (g) evidencia a distribuição espacial de cada classe (1, 2 e 6).

Tabela 6.20 - Valores do parâmetro C na microbacia hidrográfica de Montouro.

Condutividade hidráulica do aquífero (m/dia)	Valor Drastic	Área (km ²)	Área (%)
< 4.1	1	2.5	38.4
4.1 - 12.2	2	0.6	9.9
28.5 - 40.7	6	3.3	51.8
Total		6.4	100.0

A determinação do índice DRASTIC, para a microbacia hidrográfica de Montouro, foi feita através da soma ponderada de cada um dos seus parâmetros, de acordo com a equação [6.1] e usando o peso normal (Tabela 6.21) e o peso pesticidas (Tabela 6.22).

O resultado do índice DRASTIC está compreendido entre 93 e 184, apresentando baixa a alta vulnerabilidade, conforme sintetizado na Tabela 6.21 e como pode ser visualizado na Figura 6.9 (h). A maioria da área (cerca de 74 %) situa-se no intervalo de 140 a 179, com classes de vulnerabilidade de moderada (31 %) a alta (43 %), 2.2 % no intervalo 100 a 119, dividindo-se, aproximadamente, a restante área pelos intervalos 93 a 99, 120 a 139 e 180 a 184. Comparando este resultado do índice DRASTIC com o estabelecido por Lobo-Ferreira & Oliveira (1993), anteriormente apresentado (Figura 6.7), verifica-se que as classes mais elevadas se enquadram nos intervalos indicados por aqueles autores, no entanto, a análise mais pormenorizada da zona permitiu diferenciar as classes de menor vulnerabilidade.

Tabela 6.21 - Valores do índice DRASTIC na microbacia hidrográfica de Montouro.

Índice DRASTIC	Classe	Área (km ²)	Área (%)
93 - 99	Baixa	0.5	8.5
100 - 119		0.1	2.2
120 - 139	Moderada	0.5	7.2
140 - 159		1.9	30.5
160 - 179	Alta	2.8	43.4
180 - 184		0.5	8.1
	Total	6.4	100.0

Na MhM existe uma ocupação razoável do solo para práticas agrícolas, que, normalmente, se traduz na utilização de pesticidas e fertilizantes, como tal, procedeu-se à quantificação do índice DRASTIC considerando o peso pesticidas definido pelo método.

Os resultados correspondem a um mínimo de 111 e a um máximo de 217, o que equivale a uma variação da classe de vulnerabilidade entre baixa a extrema, evidenciando o acréscimo do índice e, respetivamente, o agravamento da vulnerabilidade. A área classificada com vulnerabilidade alta a extrema equivale a, aproximadamente, 76 % e, cerca de, 24 % da área com vulnerabilidade baixa a moderada (Tabela 6.22). A Figura 6.9 (i) possibilita a visualização da distribuição espacial da vulnerabilidade intrínseca referente ao peso pesticidas.

Tabela 6.22 - Valores do índice DRASTIC pesticidas na microbacia hidrográfica de Montouro.

Índice DRASTIC pesticidas	Classe	Área (km ²)	Área (%)
111 - 119	Baixa	0.4	5.9
120 - 139	Moderada	0.3	4.8
140 - 159		0.9	13.7
160 - 179	Alta	1.6	25.4
180 - 199		1.9	29.2
200 - 217	Extrema	1.3	21.0
	Total	6.4	100.0

Ambos os índices estimam maior vulnerabilidade intrínseca na zona SE da microbacia hidrográfica, coincidente com o local de afloramento das formações quaternárias e, simultaneamente, com uma das zonas favoráveis à infiltração e, conseqüente, recarga da unidade aquífera. Existem também outros três locais mais a NW onde se verifica a mesma relação (maior vulnerabilidade associada aos depósitos quaternários).

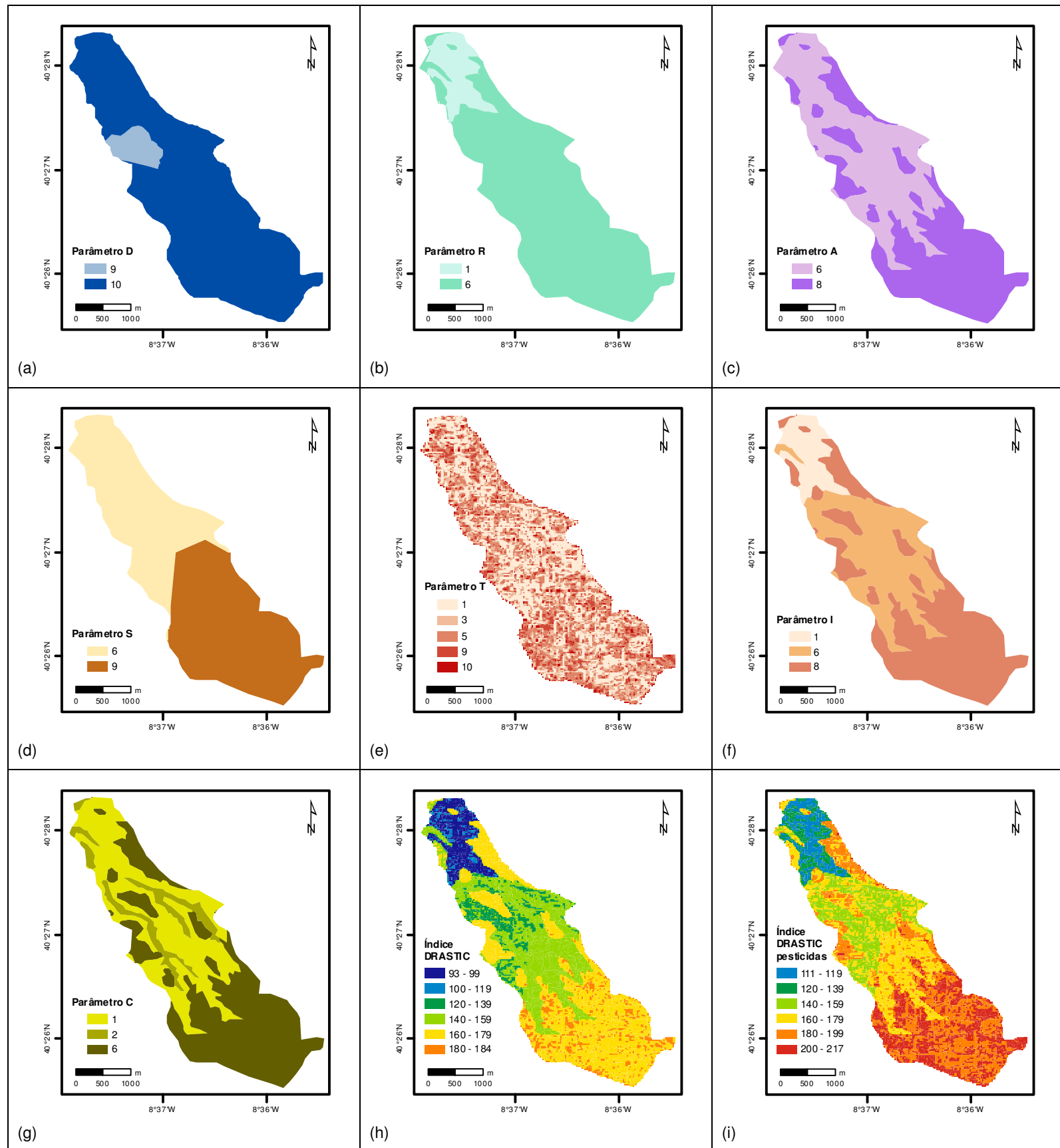


Figura 6.9 - Mapas de caracterização dos parâmetros do índice DRASTIC na MhM: parâmetro D (a), parâmetro R (b), parâmetro A (c), parâmetro S (d), parâmetro T (e), parâmetro I (f), parâmetro C (g). Mapas do índice DRASTIC (h) e do índice DRASTIC pesticidas (i) na MhM.

6.2.2 - Vulnerabilidade na bacia hidrográfica de Ferveça

A determinação da vulnerabilidade intrínseca na BhF consistiu na aplicação do método DRASTIC a toda a área e, especificamente, do método COP à extensão no interior da bacia hidrográfica ocupada pelo Sistema aquífero Cársico da Bairrada. Optou-se pelo método COP, à semelhança de Oliveira *et al.* (2014), pelo elevado grau de confiança dos resultados que permite obter, quando comparado com outros métodos mais antigos.

6.2.2.1 - Resultados do método DRASTIC

Os dados utilizados para a caracterização do parâmetro D (profundidade do nível freático) foram os da campanha de medição piezométrica no inverno de 2011 (subcapítulo 4.3.2), com níveis mais próximos da superfície e, como tal, associados a vulnerabilidade mais elevada. O predomínio das pequenas profundidades (< 1.5 m) é bem evidente, registando-se em, aproximadamente, 77.5 % da área e a que corresponde o valor 10. A restante área apresenta a classificação de valor 9 devido a profundidades dos níveis inferiores a 4.6 m. A Tabela 6.23 resume esta informação e na Figura 6.10 (a) encontra-se o mapa do parâmetro D.

Tabela 6.23 - Valores do parâmetro D na bacia hidrográfica de Ferveça.

Profundidade do nível freático (m)	Valor Drastic	Área (km ²)	Área (%)
0 - 1.5	10	47.4	77.5
1.5 - 4.6	9	13.8	22.5
	Total	61.2	100.0

O subcapítulo 4.5 apresenta a determinação da recarga (R) na bacia hidrográfica de Ferveça, com estimativas de recarga média anual de 340 mm para o Sistema aquífero Cársico da Bairrada (O3) e de 203 mm para os aquíferos do Quaternário e do Cretácico (O1, O5 e O30), o que equivale, respetivamente, a valores de 9 e 8 para este parâmetro. No entanto, a formação Margas Calcárias de S. Gião (J¹g) constitui um teto impermeável do sistema carsificado, minimizando a recarga, e para a qual se confere o valor mínimo (1) nas zonas onde aflora. Na Figura 6.10 (b) consta a representação espacial das classes da recarga, sobressaindo a área de, cerca de, 58 % do valor 8, aproximadamente, 35 % do valor 9 e o valor 1 na ordem dos 7 % (Tabela 6.24).

Tabela 6.24 - Valores do parâmetro R na bacia hidrográfica de Ferveça.

Recarga (mm/ano)	Valor Drastic	Área (km ²)	Área (%)
0 - 51	1	4.1	6.7
178 - 254	8	35.6	58.2
> 254	9	21.5	35.1
	Total	61.2	100.0

O parâmetro A (material do aquífero) foi obtido recorrendo a informação sintetizada nos subcapítulos 4.1 e 2.5, possibilitando estipular três classes de valor 6, 8 e 10, considerando arenitos e calcários estratificados e calcários maciços, areias e calcários carsificados, respetivamente (Tabela 6.25). É bem notório o predomínio de areias do manto dunar que recobre a zona com, cerca de, 73 %, seguindo-se os materiais cretácicos e jurássicos com, aproximadamente, 15 % e, finalmente, o calcário carsificado apresenta uma ocupação em, cerca de, 3 % da área. A Figura 6.10 (c) apresenta o mapeamento das classes referidas.

Tabela 6.25 - Valores do parâmetro A na bacia hidrográfica de Ferverença.

Material do aquífero	Valor Drastic	Área (km ²)	Área (%)
Arenitos e calcários estratificados e calcários maciços	6	14.7	24.0
Areias	8	44.8	73.2
Calcários carsificados	10	1.7	2.8
Total		61.2	100.0

Na bacia hidrográfica de Ferverença existem podzóis órticos, cambissolos éutricos e cálcicos e luvisolos (subcapítulo 2.8), tendo-se, com base nas suas características procedido à classificação do parâmetro tipo de solo (S). Considerou-se o valor 10 para os cambissolos éutricos com granulometria superior, o valor 9 para os podzóis órticos com granulometria arenosa, o valor 7 para os luvisolos, com maior teor de argila e, por último, o valor 6 aos cambissolos cálcicos de textura franco arenosa. As classes 10 e 7 têm pequena percentagem com apenas, aproximadamente, 1 %, a classe 6, cerca de 27 % e a maioria ocupada pela classe 9 com, cerca de 72 %. A Tabela 6.26 e a Figura 6.10 (d) apresentam a síntese destes resultados.

Tabela 6.26 - Valores do parâmetro S na bacia hidrográfica de Ferverença.

Tipo de solo	Valor Drastic	Área (km ²)	Área (%)
Franco arenoso	6	16.5	26.9
Argila agregada e/ou expansível	7	0.2	0.4
Areia	9	44.0	71.9
Conglomerado	10	0.5	0.8
Total		61.2	100.0

O parâmetro topografia (T) foi obtido através do declive, calculado com base no modelo digital do terreno. Para os intervalos de declive definidos pelo método, verifica-se que somente, cerca de, 2 % da área tem a classificação mais elevada (10) relativa a declives compreendidos entre 0 e 2 %, aproximadamente 18 % tem declive entre 2 e 6 % classificado com o valor 9, o valor 5 distribui-se por uma área na ordem de 36 %, enquanto o valor 3 e 1 ocupam, cerca de, 24 e 20 %, respetivamente (Tabela 6.27). Na Figura 6.10 (e) apresenta-se o mapa do parâmetro.

Tabela 6.27 - Valores do parâmetro T na bacia hidrográfica de Fervença.

Declive (%)	Valor Drastic	Área (km ²)	Área (%)
0 - 2	10	1.5	2.4
2 - 6	9	10.8	17.6
6 - 12	5	22.3	36.4
12 - 18	3	14.6	23.8
> 18	1	12.0	19.7
Total		61.2	100.0

O mapa com a classificação do parâmetro impacto da zona não saturada (I) está patente na Figura 6.10 (f). Os calcários carsificados de valor 10, o mais elevado, ocupam, cerca de, 3 % da área total da bacia hidrográfica, o valor 8 é o de maior extensão com, aproximadamente, 73 % relativo a areias, o valor 6 tem presença em, cerca de, 16 % da área e o valor 1, correspondente à camada confinante, perfaz cerca de 8 % (Tabela 6.28). Neste caso, considerou-se camada confinante as formações Margas Calcárias de S. Gião (J¹g) e Arenitos e argilas de Viso (C⁵).

Tabela 6.28 - Valores do parâmetro I na bacia hidrográfica de Fervença.

Impacto da zona não saturada	Valor Drastic	Área (km ²)	Área (%)
Camada confinante	1	4.6	7.5
Calcários, arenitos, camadas de arenitos e argilitos estratificados	6	10.1	16.5
Areia	8	44.9	73.2
Calcários carsificados	10	1.7	2.8
Total		61.2	100.0

O parâmetro C (condutividade hidráulica do aquífero) foi avaliado com base, maioritariamente, na informação referente aos Sistemas aquíferos e, simultaneamente, complementada com valores de referência tabelados (subcapítulo 4.1.1). Os valores deste parâmetro são de 1, 2 e 4, distribuídos por, aproximadamente, 15, 16 e 69 % da área, respetivamente. Estes elementos constam da Tabela 6.29 e na Figura 6.10 (g) é possível observar a representação areal dos valores do parâmetro da condutividade hidráulica, denotando-se a ocorrência preferencial de formações com condutividades hidráulicas mais elevadas.

Tabela 6.29 - Valores do parâmetro C na bacia hidrográfica de Fervença.

Condutividade hidráulica do aquífero (m/dia)	Valor Drastic	Área (km ²)	Área (%)
< 4.1	1	9.3	15.2
4.1 - 12.2	2	9.8	16.1
12.2 - 28.5	4	42.0	68.7
Total		61.2	100.0

O índice DRASTIC, para a bacia hidrográfica de Fervença, foi calculado a partir da equação [6.1] e recorrendo às ponderações do peso normal e do peso pesticidas, cujos resultados se apresentam na Tabela 6.30 e na Tabela 6.31. Optou-se, também, pela quantificação do índice com a ponderação relativa aos pesticidas, uma vez que, na região existe uma prática agrícola intensiva, inclusive com a utilização de estufas, e à qual, em regra, se associa a aplicação de fertilizantes e pesticidas.

Na Figura 6.11 (a) e na Figura 6.11 (b) é possível visualizar o mapeamento de ambos os índices.

Tabela 6.30 - Valores do índice DRASTIC na bacia hidrográfica de Fervença.

Índice DRASTIC	Classe	Área (km ²)	Área (%)
88 - 99	Baixa	3.515	5.745
100 - 119		0.496	0.811
120 - 139	Moderada	0.637	1.042
140 - 159		5.360	8.762
160 - 179	Alta	28.080	45.901
180 - 199		23.085	37.736
200 - 201	Extrema	0.002	0.004
	Total	61.2	100.0

Tabela 6.31 - Valores do índice DRASTIC pesticidas na bacia hidrográfica de Fervença.

Índice DRASTIC pesticidas	Classe	Área (km ²)	Área (%)
106 - 119	Baixa	2.2	3.6
120 - 139	Moderada	1.8	2.9
140 - 159		0.6	1.1
160 - 179	Alta	5.0	8.1
180 - 199		19.8	32.3
200 - 232	Extrema	31.8	52.0
	Total	61.2	100.0

O índice DRASTIC para a bacia hidrográfica de Fervença corresponde a vulnerabilidade baixa, moderada, alta e extrema, com valores variáveis entre 88 e 201. De salientar que, a vulnerabilidade extrema se verifica numa “ínfima” parte da área sem representação significativa, no entanto, a vulnerabilidade alta classifica, cerca de, 84 % da área total, o que é algo bastante expressivo e a ter em consideração. A vulnerabilidade moderada abrange, aproximadamente, 10 % da área e os restantes 6 % têm vulnerabilidade baixa.

Desprezando a vulnerabilidade extrema, podemos indicar que estes resultados do índice para a vulnerabilidade alta (cerca de 84 %) são relativamente concordantes com os indicados por Lobo-Ferreira & Oliveira (1993), sistematizados na Figura 6.7. As classes de vulnerabilidade baixa e moderada resultam da especificidade da escala de análise considerada.

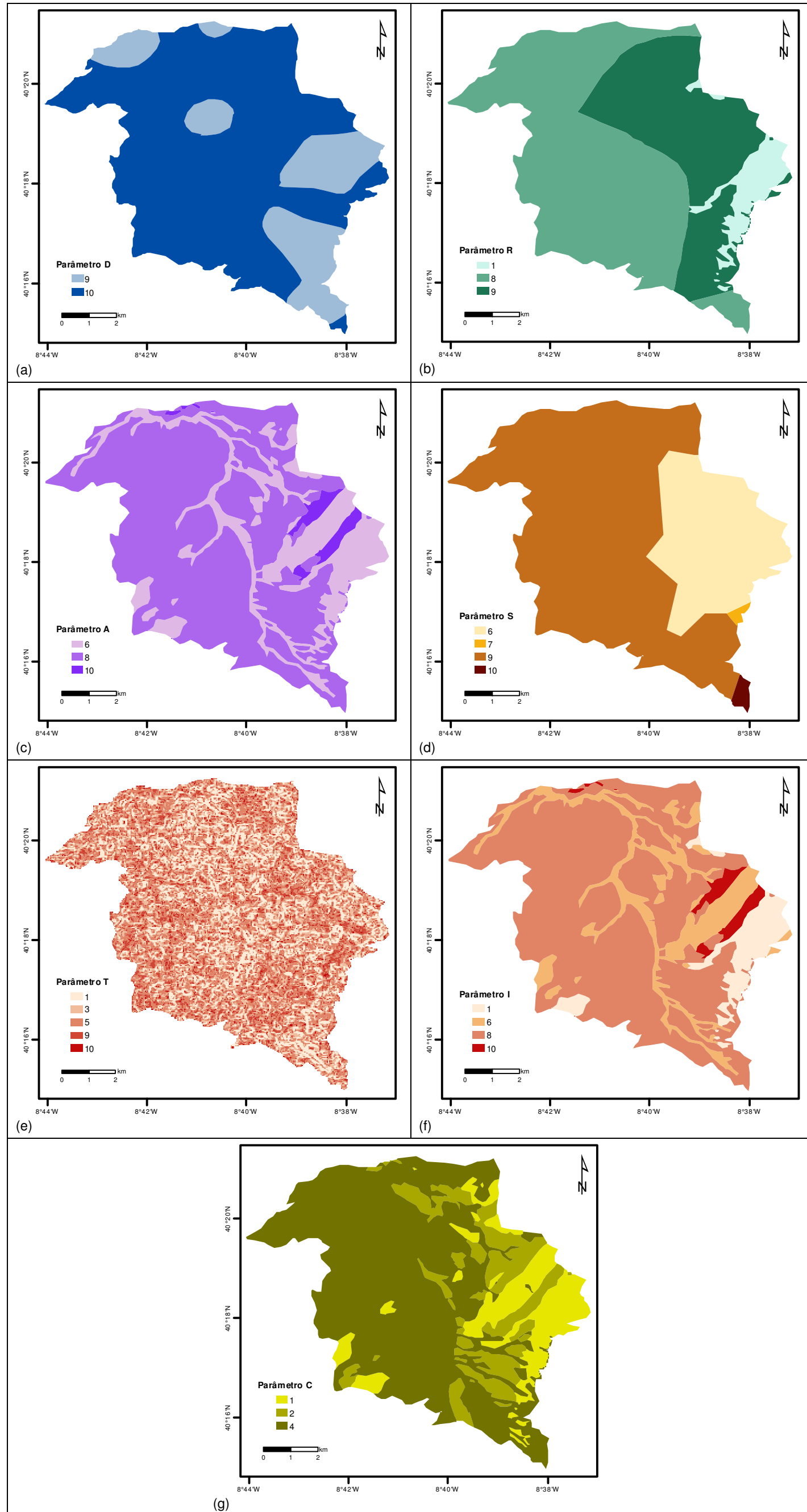


Figura 6.10 - Mapas de caracterização dos parâmetros do índice DRASTIC na BhF: parâmetro D (a), parâmetro R (b), parâmetro A (c), parâmetro S (d), parâmetro T (e), parâmetro I (f), parâmetro C (g).

Os resultados do índice DRASTIC pesticidas são superiores e estão compreendidos entre 106 e 232, agravando a vulnerabilidade intrínseca na bacia hidrográfica. As classes de maior vulnerabilidade (alta e extrema) englobam, aproximadamente, 92 % da área total, sendo os, cerca de, 8 % distribuídos pelas classes baixa e moderada, constituindo uma minoria na bacia hidrográfica.

Em síntese, podemos referir que a bacia hidrográfica de Ferverça denota vulnerabilidade intrínseca significativa em grande parte da sua área, inerente aos locais de afloramento dos materiais quaternários e das formações carsificadas.

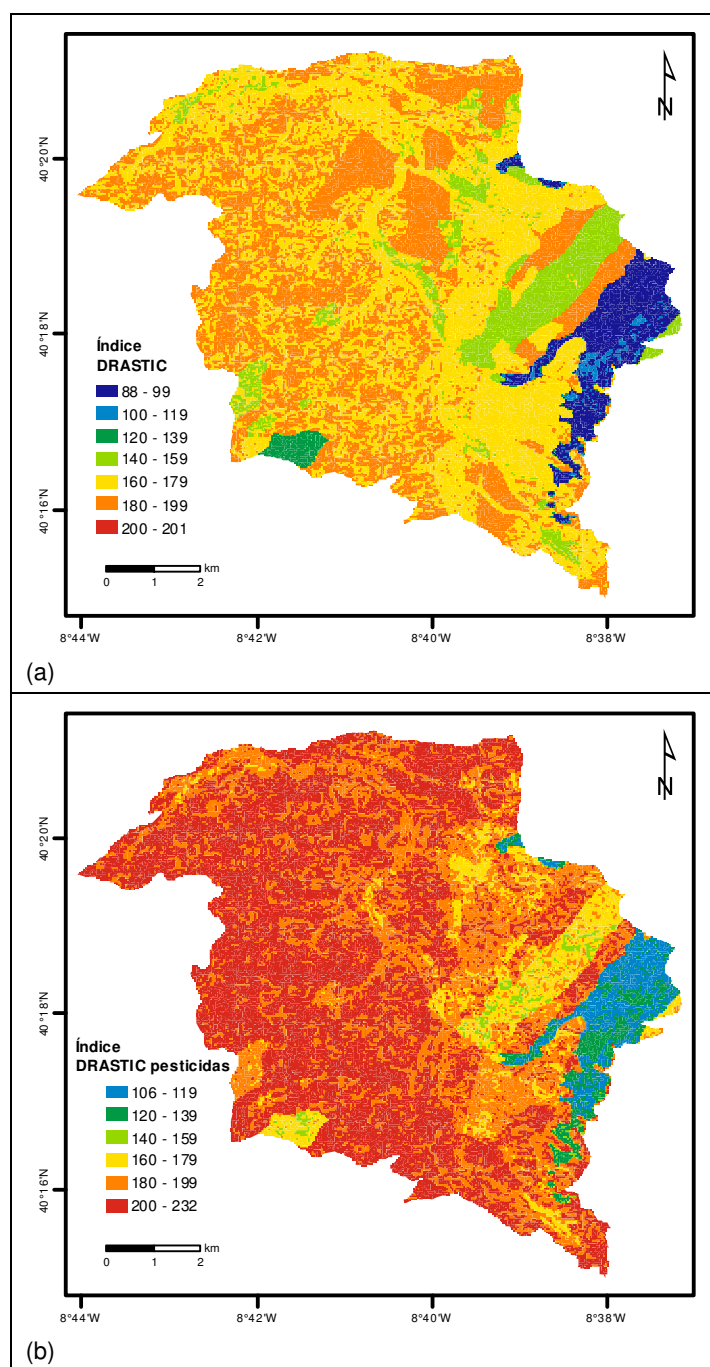


Figura 6.11 - Mapas do índice DRASTIC (a) e do índice DRASTIC pesticidas (b) na BhF.

6.2.2.2 - Resultados do método COP

A determinação do fator concentração do fluxo (C) rege-se pela caracterização de dois cenários: (i) cenário 1 com identificação de pontos de infiltração ou sumidouros existentes na área de recarga e (ii) cenário 2 relativo à restante área. De seguida, apresenta-se uma breve explicação das opções tomadas.

Cenário 1:

- na área da bacia hidrográfica de Ferverença, o Sistema aquífero Cársico da Bairrada não denota a ocorrência de pontos específicos de infiltração, traduzidos em depressões cársicas (tantas vezes detetadas por interrupção no desenvolvimento dendrítico da rede de drenagem). A infiltração ocorre de forma mais dispersa na zona aflorante das unidades carsificadas, como tal, para a avaliação da distância ao ponto de infiltração (dh) considerou-se a distância mínima entre o ponto de descarga do sistema aquífero (exurgência Olhos da Ferverença) e as unidades cársicas (J^1_f e J^1_{cd});
- a avaliação da distância ao fluxo subterrâneo (ds) teve por base a informação das sondagens mecânicas apresentadas no subcapítulo 2.5.3;
- o parâmetro declive e vegetação (sv) foi obtido, respetivamente, considerando o modelo digital do terreno e as observações *in situ*.

Após a obtenção do valor tabelado para cada um dos três parâmetros, o fator C é o resultado do produto desses valores.

Cenário 2:

- as propriedades da superfície (sf) foram estimadas através das características da geologia aflorante e descritas no subcapítulo 2.5.2;
- o parâmetro declive e vegetação (sv) foi obtido da mesma forma que no cenário 1.

O fator C advém do produto dos valores tabelados definidos para os dois parâmetros que constituem o cenário 2.

A conjugação dos dois cenários permite a elaboração do mapa do fator C na extensão do aquífero cársico, na bacia hidrográfica de Ferverença, e está representado na Figura 6.13 (a). Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 6.32 e indicam que a redução da proteção alta a muito alta é minoritária ocorrendo somente em, cerca de, 6 % comparativamente aos, cerca de, 54 % de área onde a redução de proteção é muito baixa e baixa a moderada em, aproximadamente, 23 e 17 %, respetivamente.

Tabela 6.32 - Valores do fator C para o aquífero cársico na bacia hidrográfica de Ferverença.

CRESULTADO	Redução da proteção	Área (km ²)	Área (%)
[0 - 0.2]	Muito alta	0.1	0.3
]0.2 - 0.4]	Alta	2.0	5.9
]0.4 - 0.6]	Moderada	5.8	17.0
]0.6 - 0.8]	Baixa	7.9	23.1
]0.8 - 1]	Muito baixa	18.4	53.7
	Total	34.2	100.0

A quantificação do fator camadas subjacentes (O) é feita combinando as características do solo (apresentadas no subcapítulo 2.8) e da litologia, nomeadamente tipo, espessura de cada camada e condições de confinamento (informação exposta nos subcapítulos 2.5.2 e 4.1).

Os valores de proteção alcançados são moderado, alto e muito alto, existentes em, aproximadamente, 68, 14 e 18 % da área, respetivamente (Tabela 6.33). A distribuição espacial do fator O pode ser visualizada na Figura 6.13 (b).

Tabela 6.33 - Valores do fator O para o aquífero cársico na bacia hidrográfica de Ferwença.

O RESULTADO	Valor de proteção	Área (km ²)	Área (%)
]2 - 4]	Moderado	23.2	67.9
]4 - 8]	Alto	4.8	14.0
]8 - 15]	Muito alto	6.2	18.1
Total		34.2	100.0

O fator precipitação (P) é obtido pela soma dos valores atribuídos à quantidade e à distribuição temporal decorrente das tabelas do método (Figura 6.5). Recorrendo aos dados de precipitação (apresentados em 2.3), faltava conhecer o número de dias de chuva no ano. Esta quantificação teve como fonte de informação a cartografia digital disponibilizada pela Agência Portuguesa do Ambiente – APA, como parte integrante do Atlas do Ambiente Digital, designada como Carta de precipitação – número de dias no ano (Figura 6.12).

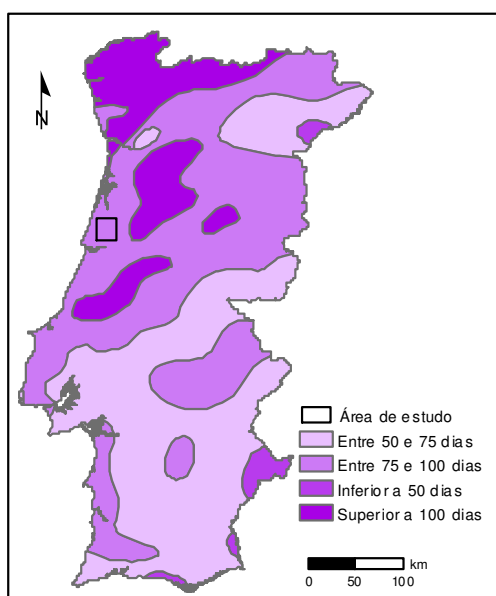


Figura 6.12 - Número de dias de precipitação no ano (adaptado de SMN, 1975).

O resultado do fator P é constante em todo o aquífero e apresenta uma classe de redução da proteção alto, visível na Figura 6.13 (c) e na Tabela 6.34.

Tabela 6.34 - Valores do fator P para o aquífero cársico na bacia hidrográfica de Ferverça.

RESULTADO	Redução da proteção	Área (km ²)	Área (%)
0.6	Alto	34.2	100.0
	Total	34.2	100.0

Na Figura 6.13 (d) apresenta-se o mapa de vulnerabilidade intrínseca do aquífero cársico, na bacia hidrográfica de Ferverça, segundo o índice COP. Os valores determinados situam-se entre 0 e 4.32 e correspondem a um predomínio de vulnerabilidade moderada a baixa com distribuição em, aproximadamente, 95 % da área, estando os restantes, cerca de, 5 % da área repartidos pelas classes de vulnerabilidade muito baixa, alta e muito alta (Tabela 6.35).

Tabela 6.35 - Valores do índice COP para o aquífero cársico na bacia hidrográfica de Ferverça.

Índice COP	Classe de Vulnerabilidade	Área (km ²)	Área (%)
[0 - 0.5]	Muito alta	0.08	0.25
]0.5 - 1]	Alta	1.57	4.58
]1 - 2]	Moderada	21.57	63.07
]2 - 4]	Baixa	10.93	31.96
]4 - 15]	Muito baixa	0.05	0.14
	Total	34.2	100.0

Os resultados de vulnerabilidade intrínseca mais elevada representam os locais de afloramento das unidades carsificadas e os resultados relativos à menor vulnerabilidade denotam a proteção do aquífero cársico que advém da presença de material de recobrimento, no entanto, dada a elevada permeabilidade destes depósitos, estes resultados devem ser considerados com alguma precaução.

Comparando os resultados dos dois métodos (DRASTIC e COP), apesar das diferentes classes dos métodos, é possível identificar alguma relação entre a hierarquia de classes, sendo perceptível a caracterização de maior percentagem com vulnerabilidade mais elevada no caso do método DRASTIC em relação ao método COP.

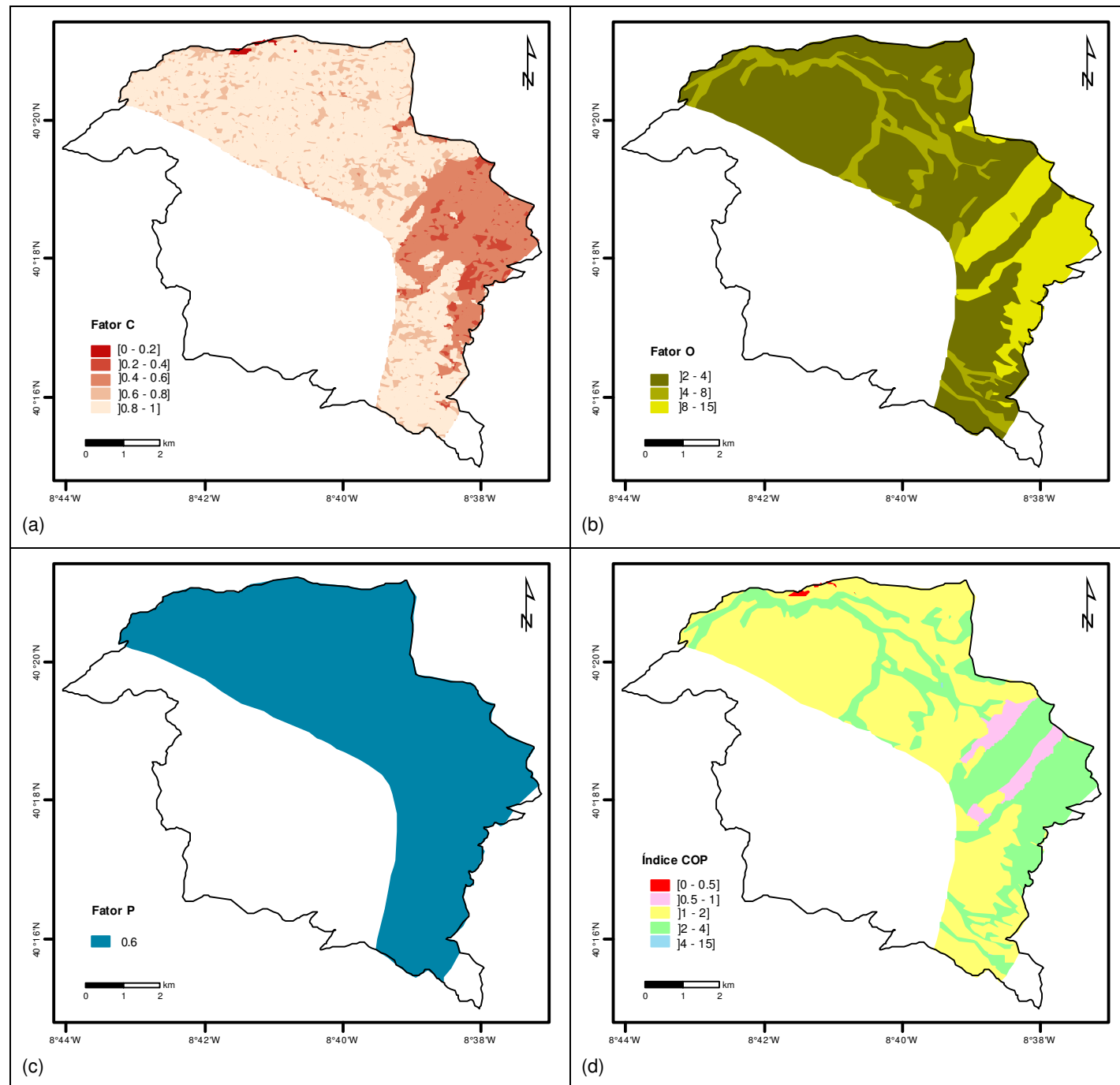


Figura 6.13 - Mapas de caracterização dos fatores do índice COP ao aquífero cársico na BhF: fator C (a), fator O (b), fator P (c). Mapa de vulnerabilidade do aquífero cársico, na BhF, segundo o índice COP (d).

6.2.3 - Método DRASTIC-SA

Ao longo do tempo têm sido vários os autores que, partindo da quantificação da vulnerabilidade intrínseca pelo método DRASTIC, propõem a subtração de fatores existentes no método (Evans & Myers, 1990; Pacheco & Fernandes, 2013) ou a inclusão de novos parâmetros (Secunda *et al.*, 1998; Lee, 2003; Mendoza & Barmen, 2006; Wang *et al.*, 2007), bem como a alteração dos pesos atribuídos a cada parâmetro (Panagopoulos *et al.*, 2006; Javadi *et al.*, 2011b; Huan *et al.*, 2012; Neshat *et al.*, 2014a).

Evans & Myers (1990), Secunda *et al.* (1998), Panagopoulos *et al.* (2006), Javadi *et al.* (2011a) e Neshat *et al.* (2014b), salientam que as modificações introduzidas num método de vulnerabilidade são implementadas com o objetivo de considerar características geológicas, geográficas e hidrogeológicas particularmente relevantes para a avaliação em certa região.

Neste estudo, agiu-se de forma semelhante. Começou por se fazer a determinação da vulnerabilidade intrínseca nas áreas em estudo e procedeu-se à identificação de um parâmetro que possa ter influência nessa vulnerabilidade.

Diversos autores referem que as estruturas geológicas aumentam a vulnerabilidade de ambientes altamente fraturados, inclusive Lee (2003) refere que o percurso de um contaminante é fortemente influenciado pela fracturação ou por uma série interligada de aberturas que podem proporcionar caminhos mais fáceis para o fluxo.

Por exemplo, nos trabalhos de Lee (2003), Mendoza & Barmen (2006), Carvalho & Pacheco (2010) e Sener & Davraz (2013), encontram-se referência a estruturas geológicas e à densidade de lineamentos, no entanto, a abordagem efetuada por cada autor é diferente da implementada neste trabalho. Lee (2003) fez a quantificação da densidade de lineamentos e acrescentou esse parâmetro ao índice DRASTIC, com uma ponderação de 5. Mendoza & Barmen (2006) modificaram o índice DRASTIC, com a inclusão do grau de influência que o comprimento, a conectividade e a densidade de lineamentos têm na vulnerabilidade, sendo que, o parâmetro designado influência de lineamentos tem ponderação 5 e é somado ao índice DRASTIC. Carvalho & Pacheco (2010), baseando-se na metodologia apresentada por Pacheco *et al.* (2004), caracterizam a densidade de lineamentos e introduzem a sua influência na determinação dos parâmetros A e I do método DRASTIC. Sener & Davraz (2013) consideram a distância aos lineamentos, tendo atribuído uma ponderação de 3 a este parâmetro que inclui o seu índice DRASTIC modificado.

Neste caso em particular, a seleção do parâmetro tem por base o facto de a região ser condicionada por alinhamentos estruturais *preferenciais*, que influenciam fortemente os escoamentos subterrâneo e superficial e que se julga poderem ter um papel importante na vulnerabilidade das unidades aquíferas. O parâmetro introduzido é designado como análise estrutural (SA), e será obtido através da conjugação da densidade de alinhamentos (SLd) com a direção de alinhamentos (SLD).

Os valores estabelecidos para a avaliação da densidade de alinhamentos estruturais tiveram em conta as características das áreas em estudo e estão expressos na Tabela 6.36 (a). Em relação à direção de alinhamentos estruturais, a atribuição de valores é feita com base na correspondência entre essa direção e o escoamento subterrâneo, ou seja, se o alinhamento estrutural é ou não favorável ao escoamento subterrâneo, como estabelecido na Tabela 6.36 (b). Posteriormente, efetua-se a soma dos dois parâmetros (SLd e SLD), obtendo-se a análise estrutural da área classificada, de acordo com os intervalos indicados na Tabela 6.36 (c).

Tabela 6.36 - Valores dos parâmetros SLd (a), SLD (b) e SA (c).

Densidade de alinhamentos estruturais - SLd (km/km ²)		Valor
[0 - 5]		1
]5 - 10]		4
]10 - 15]		6
]15 - 20]		8
> 20		10

(a)

Direção de alinhamentos estruturais (SLD)	Valor
Sem alinhamentos	0
Não favorável ao escoamento subterrâneo	1
Pouco favorável ao escoamento subterrâneo	3
Parcialmente favorável ao escoamento subterrâneo	6
Favorável ao escoamento subterrâneo	8
Muito favorável ao escoamento subterrâneo	10

(b)

Análise estrutural (SA)	Valor
[1-2]	1
[4-5]	4
[6-7]	6
[8-9]	8
[10-20]	10

(c)

A metodologia desenvolvida neste trabalho propõe a avaliação da vulnerabilidade intrínseca com o método DRASTIC-SA, que partindo da estrutura base do método DRASTIC, acrescenta o parâmetro análise estrutural (SA). É proposta a atribuição de um peso de 5, à semelhança do que foi feito por Lee (2003) e por Mendoza & Barmen (2006). A equação [6.1] é transformada na equação [6.5], em que o índice DRASTIC-SA (ID-SA) é obtido a partir da soma do índice DRASTIC (ID) com o produto do peso 5 pelo valor do parâmetro análise estrutural (SA).

$$ID-SA = ID + 5 \times SA \quad [6.5]$$

6.2.3.1 - Aplicação do método DRASTIC-SA nas áreas de estudo

Recorrendo aos alinhamentos estruturais das áreas em estudo (subcapítulo 2.6), identificados com base no modelo digital do terreno e, no caso da bacia hidrográfica de Ferveça, conjugando com a informação estrutural cartografada (Figura 2.28) resultante dos trabalhos de geofísica, procedeu-se à determinação da densidade de alinhamentos estruturais.

Os resultados de SLd para a MhM estão sintetizados na Tabela 6.37, constatando-se a existência de quatro classes (1, 4, 6 e 8), com a maioria da área distribuída pelas duas classes inferiores (SLd ≤ 10 km/km²). A Tabela 6.38 sintetiza os resultados do parâmetro SLd para a BhF, sendo caracterizada por duas classes de densidade de alinhamentos de valor 1 e 4, com, cerca de, 83 % e 17 %, respetivamente.

A representação espacial deste parâmetro para ambas as áreas encontra-se na Figura 6.14 (a) e na Figura 6.15 (a).

Tabela 6.37 - Valores do parâmetro SLD, na microbacia hidrográfica de Montouro.

Densidade de alinhamentos estruturais (km/km ²)	Valor	Área (km ²)	Área (%)
[0 - 5]	1	3.79	59.20
]5 - 10]	4	2.01	31.37
]10 - 15]	6	0.56	8.82
]15 - 20]	8	0.04	0.60
Total		6.4	100.0

Tabela 6.38 - Valores do parâmetro SLD, na bacia hidrográfica de Ferverça.

Densidade de alinhamentos estruturais (km/km ²)	Valor	Área (km ²)	Área (%)
[0 - 5]	1	50.7	82.9
]5 - 10]	4	10.5	17.1
Total		61.2	100.0

A caracterização da direção de alinhamentos estruturais teve em consideração a análise conjugada dos alinhamentos estruturais e das cartas piezométricas (subcapítulos 4.3.1 e 4.3.2), e pode ser visualizada na Figura 6.14 (b) para a MhM e, na Figura 6.15 (b) para a BhF. Constata-se que em ambas as áreas mais de 90 % não tem presença de alinhamentos e é classificada com o valor 0, distribuindo-se na restante área as classificações 1, 3, 6, 8 e 10. As direções de alinhamentos mais favoráveis ao escoamento (valor 8 e 10) correspondem a, aproximadamente, 4 % e 2 %, na área da MhM e da BhF, respetivamente (Tabela 6.39).

Tabela 6.39 - Valores do parâmetro SLD, na MhM e na BhF.

Direção de alinhamentos estruturais	Valor	MhM		BhF	
		Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Sem alinhamentos	0	5.8	90.9	56.1	91.7
Não favorável ao escoamento subterrâneo	1	0.2	2.7	2.2	3.6
Pouco favorável ao escoamento subterrâneo	3	0.1	1.2	1.0	1.6
Parcialmente favorável ao escoamento subterrâneo	6	0.1	1.1	0.9	1.5
Favorável ao escoamento subterrâneo	8	0.1	2.2	0.3	0.5
Muito favorável ao escoamento subterrâneo	10	0.1	1.8	0.7	1.1
Total		6.4	100.0	61.2	100.0

Após a avaliação individual dos dois parâmetros que contribuem para o parâmetro análise estrutural, procedeu-se à soma dos seus valores e posterior reclassificação. Na Figura 6.14 (c) e na Figura 6.15 (c) apresentam-se os mapas representativos da distribuição espacial de SA e os resultados estão sintetizados na Tabela 6.40.

Na MhM, cerca de, 59 % pertence à classe de valor 1, aproximadamente, 28 % à classe de valor 4, o valor 6 tem presença em, cerca de, 8 % e 5 % de valor máximo (10), com a representação da classe 8 a ser residual. Na BhF ocorre maioritariamente a classe de valor 1 com, cerca de, 80 %, seguindo-se a classe 4 com, aproximadamente, 16 % e a classe mais elevada (valor 10) ocupa, na ordem de, 2 %, e as classes 6 e 8 distribuem-se, de forma minoritária, pelo restante espaço.

Tabela 6.40 - Valores do parâmetro SA, na MhM e na BhF.

Análise estrutural (SA)	Valor	MhM		BhF	
		Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
[1-2]	1	3.8	58.9	49.0	80.1
[4-5]	4	1.8	27.5	10.0	16.4
[6-7]	6	0.5	7.7	0.7	1.2
[8-9]	8	0.1	0.8	0.2	0.3
[10-20]	10	0.3	5.1	1.2	2.0
	Total	6.4	100.0	61.2	100.0

Em síntese, podemos referir que, em ambas as bacias hidrográficas o parâmetro da análise estrutural (SA) apresenta um domínio das classes de valor inferior, no entanto, é notória a identificação de locais onde as classes de valor mais elevado sobressaem, revelando-se como potenciais colaboradores para o aumento da vulnerabilidade.

A vulnerabilidade intrínseca para as áreas de estudo, determinada pelo método DRASTIC-SA, pode ser observada na Figura 6.14 (d) e na Figura 6.15 (d), estando bem delimitada a presença dos alinhamentos estruturais e o seu contributo para o aumento dos valores do índice.

Os resultados indicam uma variação deste índice entre 98 e 234 para a microbacia hidrográfica de Montouro e entre 93 e 243 para a bacia hidrográfica de Ferverça. Em ambas as áreas é dominante a classe de vulnerabilidade alta (160 – 199) com, cerca de, 65 % e 79 % para a MhM e a BhF, respetivamente (Figura 6.16). A vulnerabilidade extrema (> 200) ocorre em, aproximadamente, 6 % e 10 %, a moderada (120 – 159) em, cerca de, 20 % e 5 % e a baixa (< 119) na, ordem de, 9 % e 6 %, respetivamente, na MhM e na BhF.

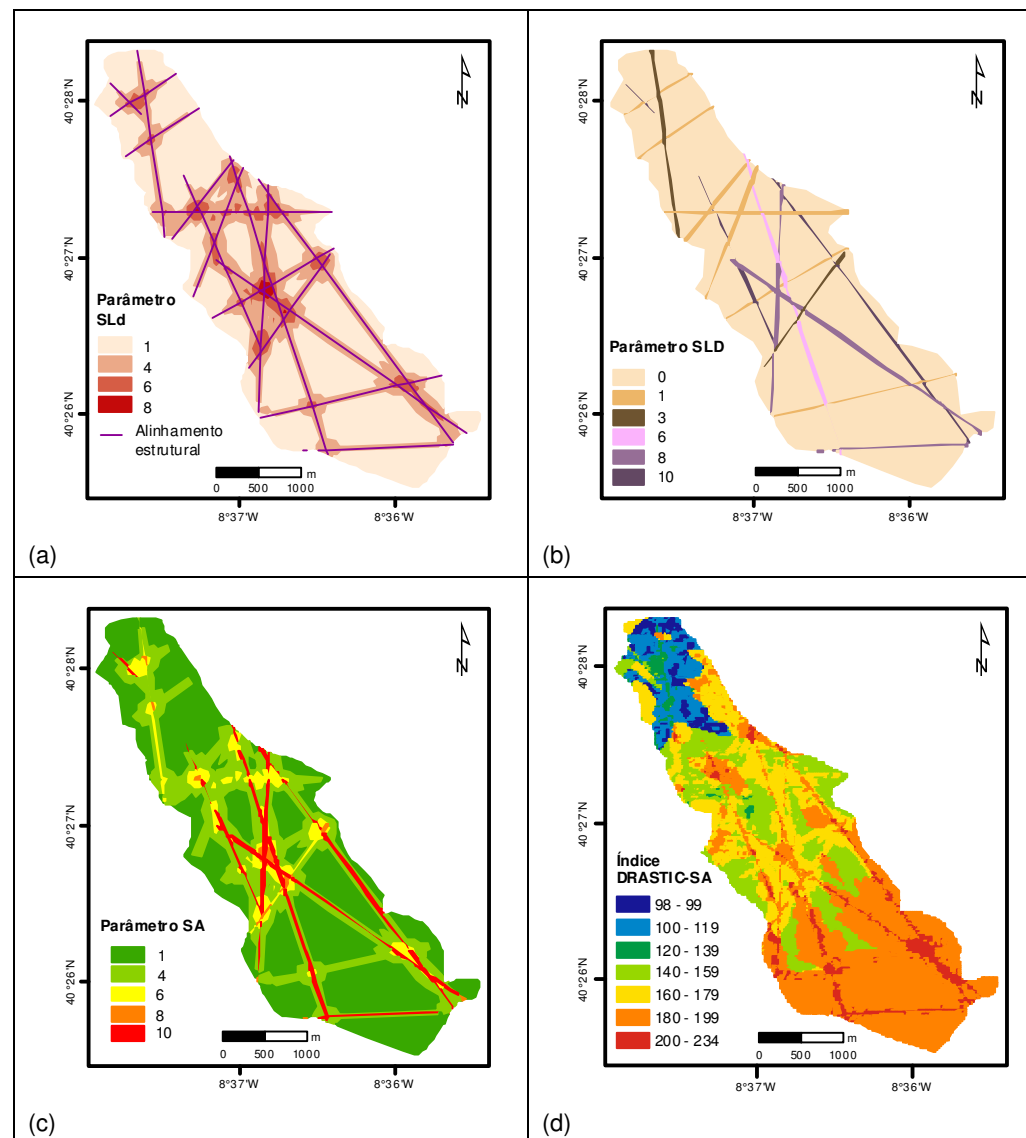


Figura 6.14 - Mapas de caracterização do parâmetro SLd (a), do parâmetro SLD (b), do parâmetro SA (c) e do índice DRASTIC-SA (d), na MhM.

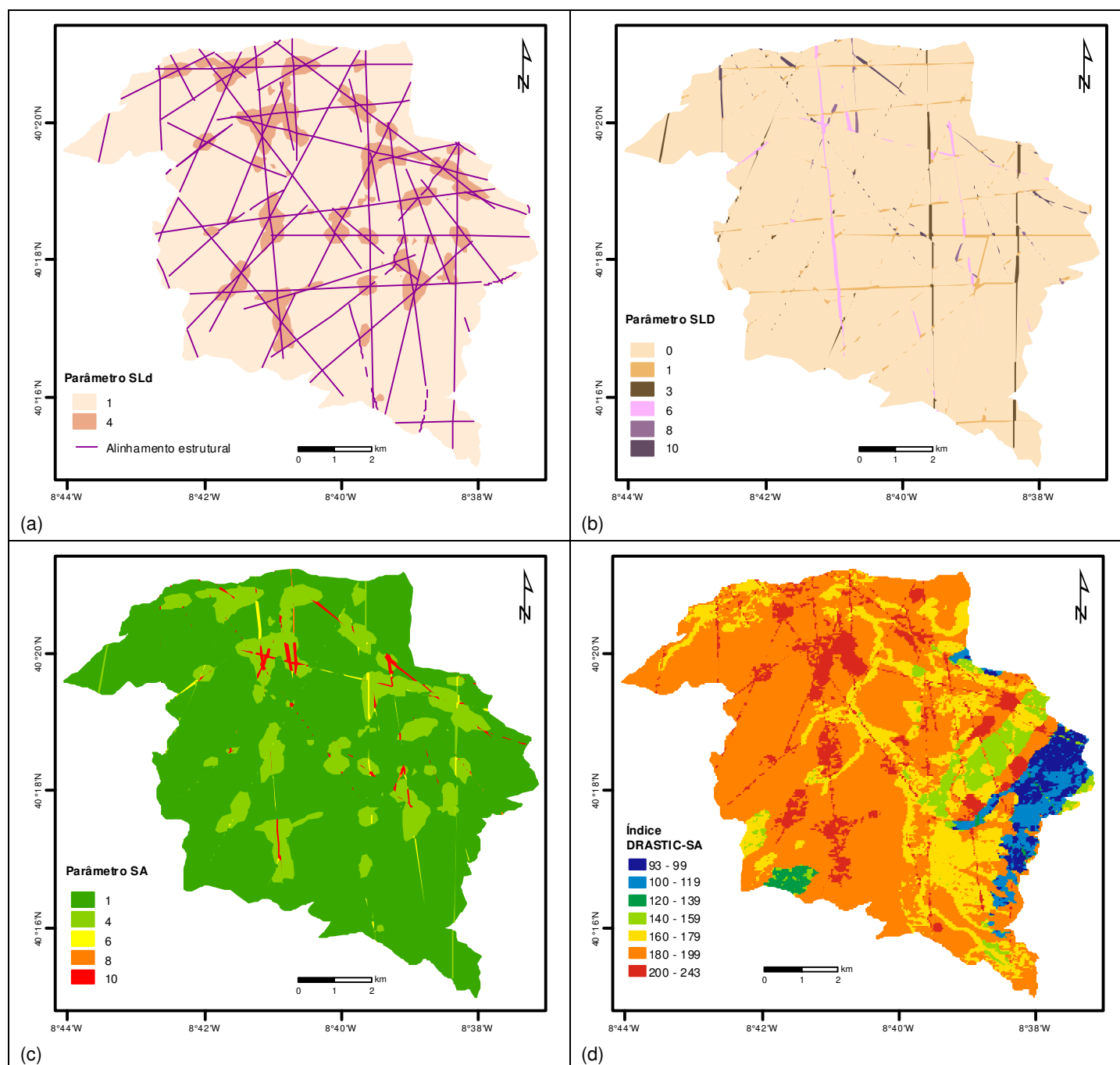


Figura 6.15 - Mapas de caracterização do parâmetro SLd (a), do parâmetro SLD (b), do parâmetro SA (c) e do índice DRASTIC-SA (d), na BhF.

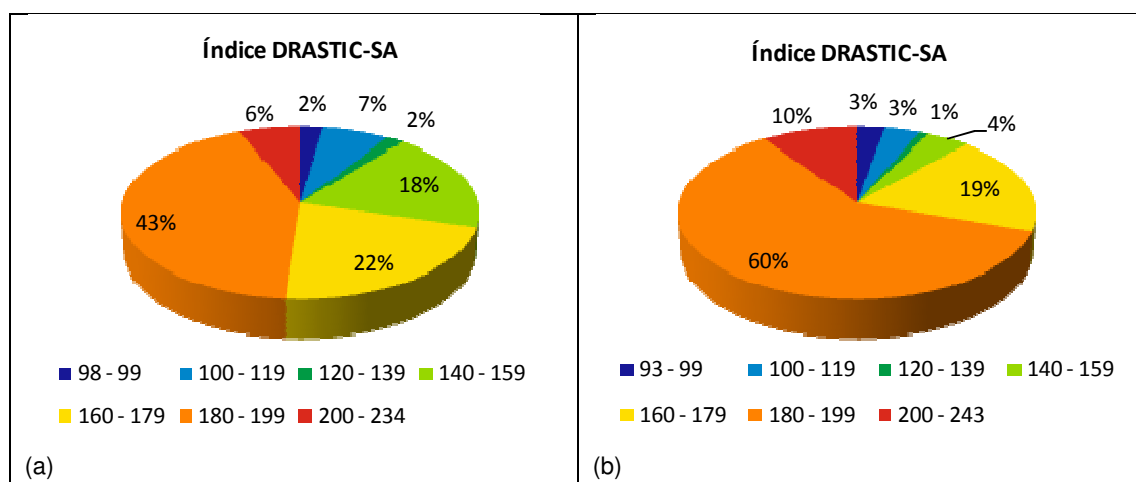


Figura 6.16 - Valores percentuais das áreas do índice DRASTIC-SA na MhM (a) e na BhF (b).

6.2.4 - Metodologia de calibração

Antonakos & Lambrakis (2007) referem que muitas propostas de melhoria são sugeridas ao método DRASTIC, no entanto, poucas tentativas foram realizadas para validar e verificar o seu desempenho. Vías *et al.* (2010) salientam a importância da validação dos mapas de vulnerabilidade, de modo a constituírem uma base na gestão do uso dos solos e na proteção da água subterrânea.

Panagopoulos *et al.* (2006) defendem que a melhoria do método DRASTIC está dependente da correlação entre a vulnerabilidade e os valores da concentração de nitratos. Sener *et al.* (2009) salientam que os dados obtidos a partir de investigações hidrogeológicas devem ser usados para a ponderação dos parâmetros e que a precisão do mapa de vulnerabilidade deve ser verificada com os dados disponíveis de poluentes, tais como nitratos e pesticidas.

Geralmente, o nitrato não está presente na água subterrânea sob condições naturais, ele infiltra a partir da superfície, como tal, pode ser usado como indicador para mostrar onde o índice de vulnerabilidade representa corretamente a atual situação da área de estudo (Javadi *et al.*, 2011b).

A otimização do método DRASTIC, por revisão dos pesos dos parâmetros, com base nos nitratos deve satisfazer as seguintes condições (Panagopoulos *et al.*, 2006): o nitrato deve ser resultante das atividades agrícolas; ter distribuição relativamente uniforme na área; a lixiviação do nitrato deve ser devida à recarga da superfície que se processa ao longo do tempo, de modo a assegurar a correlação entre a contaminação e as atividades humanas. A metodologia proposta por estes autores considera três fases: (1) a revisão da escala de valores de cada parâmetro, (2) a revisão dos pesos dos parâmetros e (3) a adição ou subtração de parâmetros.

A revisão da escala de valores de cada parâmetro é feita através da relação com a concentração de nitratos segundo a equação [6.6], sendo $r^{\#}$ o valor modificado do parâmetro, r_{max} e r_{min} , respetivamente, os valores máximo e mínimo do parâmetro na região em estudo, $[NO_3^-]$ é a concentração de nitrato medida num ponto e $[NO_3^-]_{max}$ e $[NO_3^-]_{min}$ corresponde à concentração máxima e mínima, respetivamente, medida na região estudada.

$$r^{\#} = \frac{r_{max} \times ([NO_3^-]_{max} - [NO_3^-]_{min}) - (r_{max} - r_{min}) \times ([NO_3^-]_{max} - [NO_3^-])}{[NO_3^-]_{max} - [NO_3^-]_{min}} \quad [6.6]$$

A revisão dos pesos dos parâmetros é realizada recorrendo à correlação de cada parâmetro com a concentração de nitratos, usando, por exemplo, o fator de correlação de Spearman que se adequa ao tipo de dados. O valor modificado do peso ($w^{\#}$) é obtido através da equação [6.7], em que w corresponde ao peso de cada parâmetro, com w_{max} e w_{min} , respetivamente, relativos aos pesos máximo e mínimo do método DRASTIC e C equivale ao valor da correlação entre cada parâmetro e a concentração de nitratos, sendo C_{max} e C_{min} os valores máximo e mínimo de todas as correlações, respetivamente. Em Pacheco & Fernandes (2013) encontram-se estas equações e uma descrição completa da metodologia.

$$w^{\#} = \frac{w_{max} \times (C_{max} - C_{min}) - (w_{max} - w_{min}) \times (C_{max} - C)}{C_{max} - C_{min}} \quad [6.7]$$

Nos casos em que um dos coeficientes não é estatisticamente significativo, o parâmetro correspondente pode ser excluído da equação de vulnerabilidade, como salientado por Panagopoulos *et al.* (2006).

6.2.4.1 - Calibração dos métodos nas áreas de estudo

A calibração dos métodos DRASTIC e DRASTIC-SA nas áreas em estudo, com base na concentração de nitratos, recorreu aos dados apresentados no subcapítulo 5.2.2 para aquele elemento químico. Em ambas as áreas verificam-se as condições, ou seja, existem atividades agrícolas (além de, à época do trabalho de campo, o saneamento básico estar em fase de implementação), com distribuição uniforme que introduzem o nitrato na água subterrânea. Seguindo a metodologia, procedeu-se à revisão da escala de valores de cada parâmetro e em cada uma das áreas de estudo (estes resultados não são apresentados); no entanto, optou-se por manter os valores estipulados pelo método. Efetuou-se a redefinição dos pesos de cada parâmetro nas zonas de estudo, e posteriormente recalculou-se o índice, obtendo-se um índice DRASTIC modificado e um índice DRASTIC-SA modificado. Finalmente, fez-se a análise comparativa dos resultados da correlação de Spearman, obtida com recurso ao *software* SPSS (IBM, 2013), para cada índice quantificado.

Os resultados dos pesos modificados dos parâmetros DRASTIC e DRASTIC-SA, através da concentração de nitratos, para a microbacia hidrográfica de Montouro estão sintetizados na Tabela 6.41 e na Tabela 6.42, respetivamente. Como se pode constatar, existe valorização dos parâmetros A, S e C, com ligeira descida do peso de R e I, sendo que D e T mantiveram os pesos. Quanto ao índice DRASTIC-SA, o parâmetro SA revela a maior correlação, mantendo o peso, os restantes parâmetros denotam comportamento semelhante ao anteriormente descrito (para o índice DRASTIC), com ligeiros ajustes nos valores dos pesos.

Os pesos modificados foram utilizados na determinação de novos mapas de vulnerabilidade intrínseca para a MhM, tendo sido obtido resultados de 114.2 a 212.9 para o índice DRASTIC modificado, visível na Figura 6.17 (a1), e de 113 a 251.2 para o índice DRASTIC-SA modificado representado na Figura 6.17 (b1). A Figura 6.17 (a2) e a Figura 6.17 (b2) correspondem aos mapas relativos a cada índice DRASTIC sem os pesos modificados, por forma a facilitar a comparação de resultados.

Tabela 6.41 - Pesos originais e modificados e coeficiente de correlação dos parâmetros DRASTIC com a concentração de nitratos, na MhM.

Parâmetro	Peso original	Coefficiente de Spearman	Peso modificado
D	5	0.35	4.9
R	4	0.15	3.4
A	3	0.36	5.0
S	2	0.20	3.7
T	1	-0.17	1.0
I	5	0.27	4.3
C	3	0.27	4.3

Tabela 6.42 - Pesos originais e modificados e coeficiente de correlação dos parâmetros DRASTIC-SA com a concentração de nitratos, na MhM.

Parâmetro	Peso original	Coefficiente de Spearman	Peso modificado
D	5	0.35	4.6
R	4	0.15	3.2
A	3	0.36	4.7
S	2	0.20	3.6
T	1	-0.17	1.0
I	5	0.27	4.0
C	3	0.27	4.0
SA	5	0.40	5.0

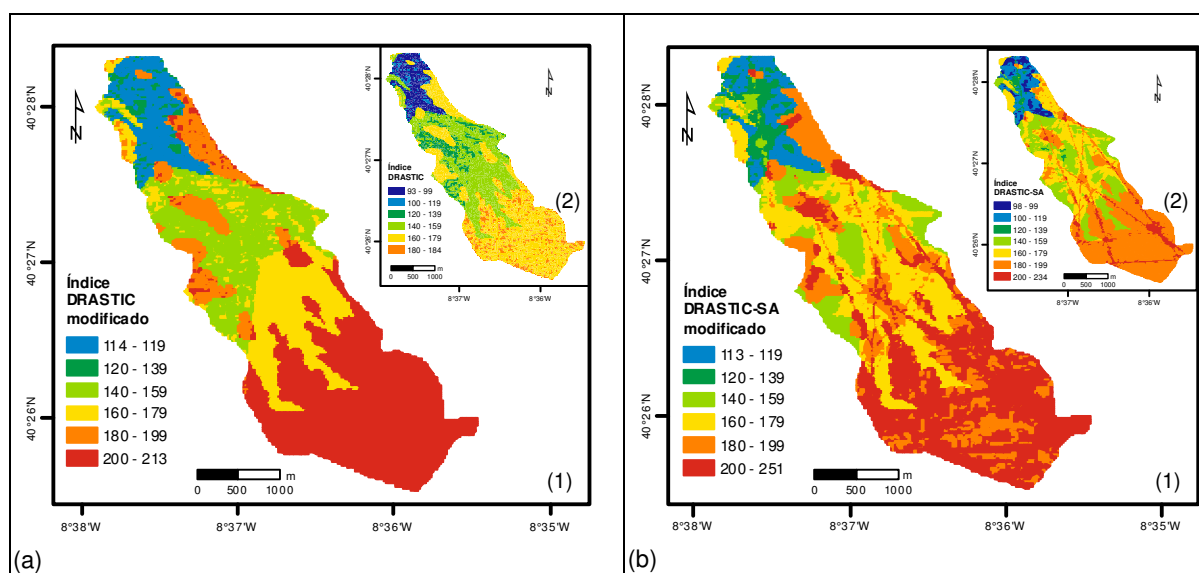


Figura 6.17 - Mapa do índice DRASTIC modificado (a1), comparativamente ao do índice DRASTIC (a2) e mapa do índice DRASTIC-SA modificado (b1) comparativamente ao do índice DRASTIC-SA (b2), na MhM.

Os resultados do índice DRASTIC modificado indicam que, cerca de, 42 % da área apresenta vulnerabilidade extrema, 30 % vulnerabilidade alta, 20 % vulnerabilidade moderada e 8 % vulnerabilidade baixa (Figura 6.18 (a)). O índice DRASTIC-SA modificado atenua a classe de vulnerabilidade extrema, que se distribui por, aproximadamente, 32 % da área total da MhM, no entanto, a classe de vulnerabilidade alta sofre acréscimo e apresenta, cerca de, 48 %. A vulnerabilidade moderada a baixa ocupa 20 % da área. Estes resultados estão resumidos na Figura 6.18 (b). Como se constata, os índices modificados denotam um agravamento da vulnerabilidade intrínseca relativamente ao respetivo cálculo inicial de cada índice.

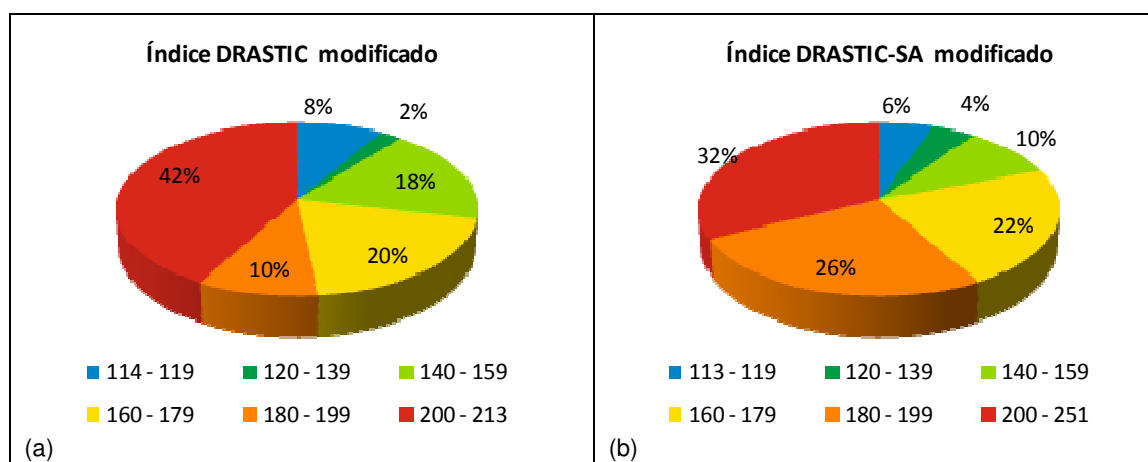


Figura 6.18 - Valores percentuais das áreas do índice DRASTIC modificado (a) e do índice DRASTIC-SA modificado (b), na microbacia hidrográfica de Montouro.

Na MhM, os resultados do coeficiente de correlação de Spearman dos diversos índices DRASTIC calculados (DRASTIC, DRASTIC modificado, DRASTIC pesticidas, DRASTIC-SA e DRASTIC-SA modificado) com a concentração de nitratos estão graficamente representados na Figura 6.19. O coeficiente exibe variação entre 0.02 para o DRASTIC modificado e 0.43 para o DRASTIC-SA. A correlação para o índice DRASTIC pesticidas (0.23), apesar de baixa, é mais forte que para o índice DRASTIC (0.13).

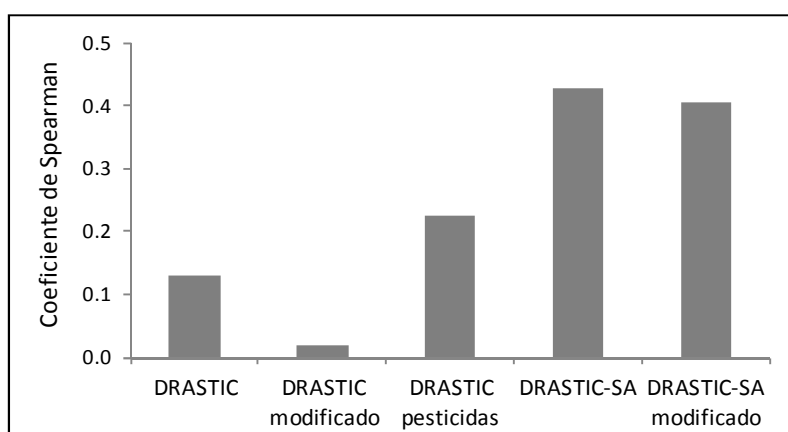


Figura 6.19 - Comparação dos valores do coeficiente de correlação dos vários índices com a concentração de nitratos, na microbacia hidrográfica de Montouro.

Em síntese, na MhM existe melhor correlação entre nitratos e o índice DRASTIC que inclui o parâmetro introduzido, SA, com os mais elevados valores de correlação, que se traduz na melhoria do método inicial e na validação da sua aplicabilidade nesta área de estudo, com base nesta metodologia de calibração.

Na bacia hidrográfica de Fervença, efetuou-se uma abordagem semelhante com a quantificação dos pesos modificados dos parâmetros DRASTIC e DRASTIC-SA, através da aplicação da equação [6.7] e cujos resultados se resumem na Tabela 6.43. A correlação revela-se pouco significativa nos parâmetros R, A, I, C e SA, o que poderia levar à sua exclusão no cálculo do índice de vulnerabilidade, no entanto, por se considerar que alguns destes parâmetros são demasiado importantes, optou-se por prosseguir a determinação dos índices modificados com a participação de todos. Além disso, a amostragem de vinte pontos de água dispersos na bacia hidrográfica, aparentemente, poderá ser insuficiente para traduzir a distribuição do nitrato na totalidade da área e, possivelmente, estará a condicionar em demasia aqueles resultados. O parâmetro D mantém a sua ponderação, com os parâmetros S e T a subirem os seus pesos.

Tabela 6.43 - Pesos originais e modificados e coeficiente de correlação dos parâmetros DRASTIC e DRASTIC-SA com a concentração de nitratos, na BhF.

Parâmetro	Peso original	Coefficiente de Spearman	Peso modificado
D	5	0.53	5.0
R	4	0.05	1.3
A	3	0.03	1.1
S	2	0.18	2.3
T	1	0.19	2.4
I	5	0.02	1.0
C	3	0.05	1.2
SA	5	0.04	1.2

A Figura 6.20 (a1) e a Figura 6.20 (b1) apresentam a distribuição espacial dos índices DRASTIC modificado e DRASTIC-SA modificado, na bacia hidrográfica. Os resultados de ambos os índices foram reduzidos, consequência da diminuição da ponderação dos parâmetros, apresentando valores de vulnerabilidade entre 71.3 e 129 e entre 72.5 e 140, respetivamente, no índice DRASTIC modificado e no índice DRASTIC-SA modificado. É possível observar a respetiva diferença dos resultados de cada índice com a observação simultânea da Figura 6.20 (a2) e da Figura 6.20 (b2).

A ocupação percentual das áreas de vulnerabilidade do índice DRASTIC modificado estão esquematizadas na Figura 6.21 (a), com predomínio da vulnerabilidade baixa em, cerca de, 86 %, a vulnerabilidade moderada ocorre em, aproximadamente, 12 % e, na ordem de, 2 % revela vulnerabilidade insignificante (< 79). Na Figura 6.21 (b) está a representação gráfica das áreas ocupadas por cada classe de vulnerabilidade para o índice DRASTIC-SA modificado, verificando-se a existência de vulnerabilidades insignificante (em, cerca de, 2 %), baixa (aproximadamente, 80 %) e moderada (cerca de, 18 %, com o intervalo de 140 – 159 a apresentar um valor ínfimo).

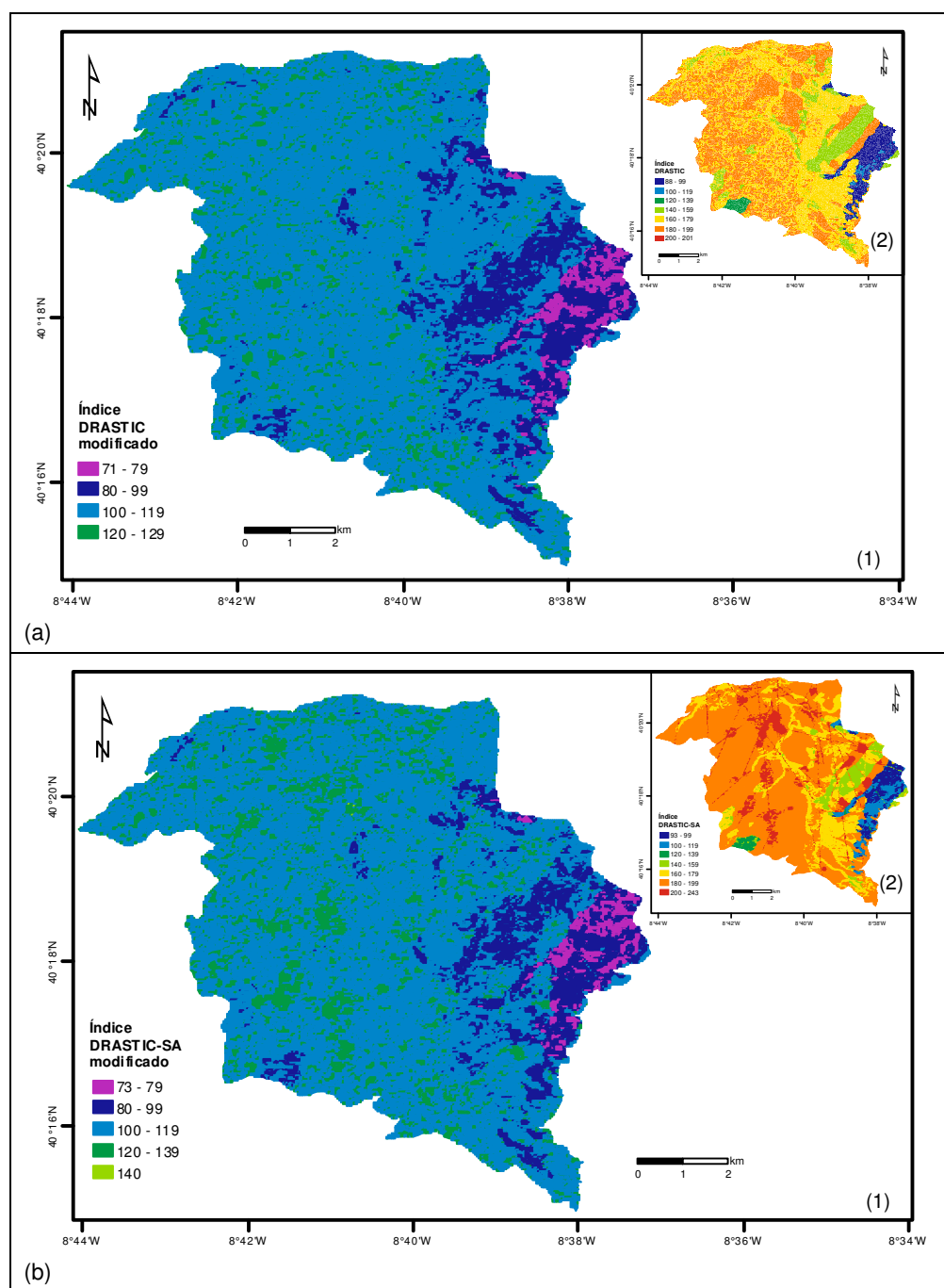


Figura 6.20 - Mapa do índice DRASTIC modificado (a1), comparativamente ao do índice DRASTIC (a2) e mapa do índice DRASTIC-SA modificado (b1) comparativamente ao do índice DRASTIC-SA (b2), na BhF.

A correlação de Spearman, relativa aos vários índices com a concentração de nitratos, para a BhF está representada na Figura 6.22. No geral, constata-se que as correlações não são muito elevadas, sendo idênticas no caso dos índices DRASTIC, DRASTIC pesticidas e DRASTIC-SA, com valores de -0.27, -0.30 e -0.25, respetivamente; denota-se uma relação inversa com a variação em sentido contrário das variáveis em análise. Isto poderá ser indiciador da necessidade de reforçar a malha de amostragem do elemento nitrato, como anteriormente referido, para melhor aferir estes resultados. Os índices modificados revelam correlações muito baixas, de ordem de grandeza semelhante, mas de valor oposto com, cerca de, 0.03 e -0.04, respetivamente para os índices DRASTIC modificado e DRASTIC-SA modificado.

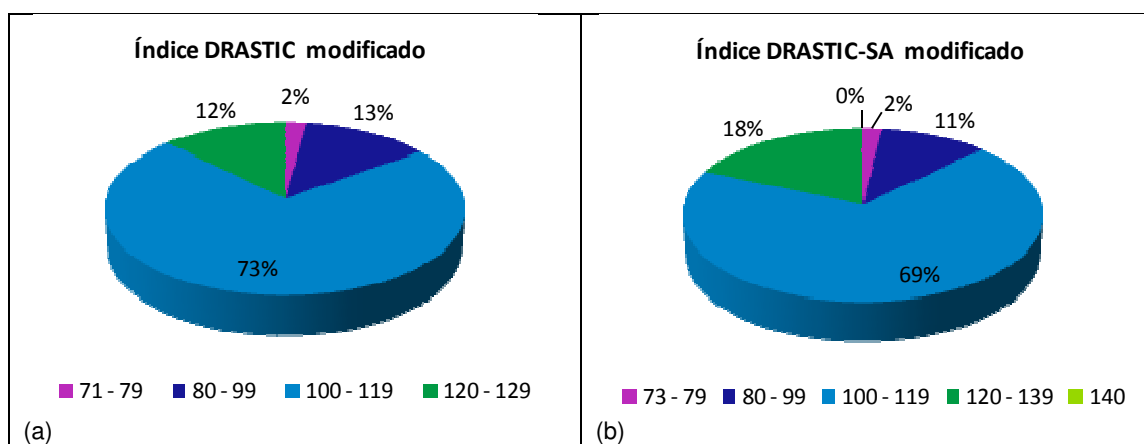


Figura 6.21 - Valores percentuais das áreas do índice DRASTIC modificado (a) e do índice DRASTIC-SA modificado (b), na bacia hidrográfica de Ferveça.

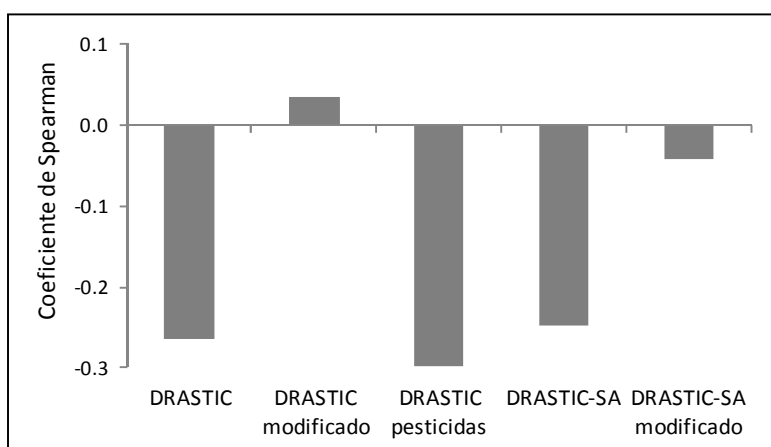


Figura 6.22 - Comparação dos valores do coeficiente de correlação dos vários índices com a concentração de nitratos, na bacia hidrográfica de Ferveça.

Em suma, com base nos dados disponíveis e considerando a correlação com a concentração de nitratos, o índice DRASTIC pesticidas é o que apresenta melhor resultado para a bacia hidrográfica de Ferveça, apesar da semelhança de resultados com o índice DRASTIC e DRASTIC-SA.

6.3 - Avaliação da perigosidade nas áreas de estudo

A avaliação da perigosidade baseou-se na metodologia RUN, implementada por Matias (2010), cujas siglas remetem para os três parâmetros/fatores do método, nomeadamente Rede viária (R), Uso do solo (U) e Nitratos (concentração) na água subterrânea (N).

Mantiveram-se os princípios da metodologia, no entanto, foram introduzidas alterações e adaptações resultantes das características das zonas de estudo. De seguida, apresenta-se uma descrição do método modificado e designado como RNLUN, que possibilita a

determinação do índice de perigosidade (HI). A Figura 6.23 tem um esquema geral desta metodologia.

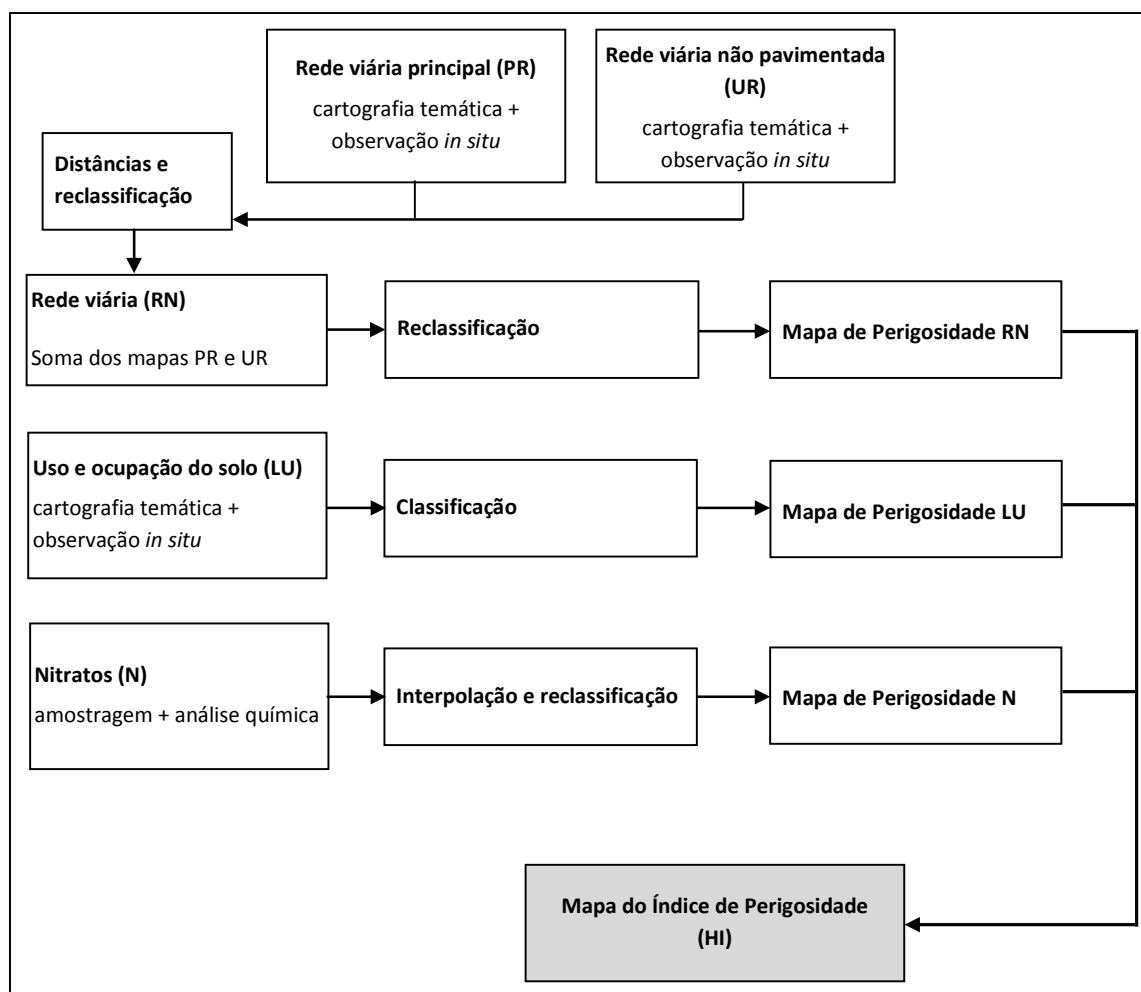


Figura 6.23 - Esquema geral da metodologia RNLUN aplicada ao estudo do índice de perigosidade (HI).

A rede viária, concretamente o escoamento rodoviário, é uma fonte de poluição difusa linear, com características de poluentes e tipo de descarga no meio ambiente muito específicas (Vieira *et al.*, 2013). Os principais constituintes das águas de escorrência de estradas são compostos orgânicos, sólidos dissolvidos e suspensos, hidrocarbonetos e metais pesados, resultantes, por exemplo, dos gases de combustão, da degradação de componentes, da manutenção da via, ou de contaminação pontual associada a derrames e fugas de materiais contaminantes durante o transporte.

O parâmetro RN considera a distância à rede viária, tendo como premissa de que quanto mais próximo de uma rede viária se encontrarem as águas subterrâneas maior o perigo de serem contaminadas pelas atividades decorrentes do tráfego rodoviário (Matias, 2010).

Na versão original do método, são, apenas, contempladas as estradas principais, no entanto, nas áreas em estudo existe grande concentração de estradas, inclusive muitas não pavimentadas, mas que são usadas regularmente no acesso aos terrenos agrícolas e também

nas ligações entre povoações. O que significa que, apesar de o tráfego nas estradas não pavimentadas ser menor e haver menor perigosidade, não estão isentas, principalmente pelo tipo de maquinaria que por lá circula.

Agruparam-se as estradas em duas subclasses: (1) rede viária principal (PR), que engloba todas as estradas pavimentadas, como autoestradas e seus acessos, estradas nacionais, regionais e municipais e, (2) rede viária não pavimentada (UR), que inclui muitos acessos e, a vulgarmente conhecida, estrada de terra batida.

Considerando as mesmas distâncias à rede viária propostas por Matias (2010), estipularam-se valores para cada classe de perigosidade como indicado na Tabela 6.44 (a) para a rede viária principal, e na Tabela 6.44 (b) para a rede viária não pavimentada. Constroem-se os mapas respetivos com a classificação de cada área criada à volta de cada estrada, posteriormente procede-se à soma dos dois mapas e obtém-se o mapa de perigosidade da rede viária (RN), reclassificado de acordo com os intervalos definidos na Tabela 6.44 (c).

Tabela 6.44 - Valores da classe de perigosidade da rede viária principal (a), da rede viária não pavimentada (b) e rede viária (c).

Classe de perigosidade da PR	Distância à rede viária (m)	Valor
Muito elevada	≤ 40	10
Elevada	40 - 60	8
Moderada	60 - 500	3
Baixa	> 500	0

(a)

Classe de perigosidade da UR	Distância à rede viária (m)	Valor
Elevada	≤ 40	5
Moderada	40 - 60	3
Baixa	60 - 500	1
Muito baixa	> 500	0

(b)

Intervalos de perigosidade da RN	Classe de perigosidade da RN	Valor
[10-15]	Muito elevada	10
[8-9]	Elevada	8
[5-6]	Moderada a elevada	5
[3-4]	Moderada	3
1	Baixa	1
0	Muito baixa	0

(c)

Uma pequena observação relativa à rede ferroviária que de forma semelhante à rede viária poderia ser considerada, no entanto, nas áreas em estudo este tipo de rede não existe ou está desativada e, como tal, não foi tida em consideração.

O parâmetro LU, relativo ao uso e ocupação do solo, evidencia a presença de atividades desenvolvidas à superfície que podem afetar adversamente a qualidade da água subterrânea, com a introdução de potenciais poluentes resultantes de descargas industriais, lixos, fertilizantes e pesticidas, entre outros, cujos lixiviados poderão chegar aos níveis freáticos.

O mapa do uso e ocupação do solo permite inferir os locais onde há maior ou menor perigo de contaminação. A relação entre LU e o seu potencial contaminante foi estabelecida com base na consulta de trabalhos de diversos autores (Secunda *et al.*, 1998; De Ketelaere *et al.*, 2004; Ribeiro, 2005; Panagopoulos *et al.*, 2006; Matias, 2010), tendo-se obtido a escala de valores

proposta na Tabela 6.45. As classes de perigosidade definidas variam entre extremamente baixa a extremamente elevada.

A tipologia dos usos do solo seguiu a classificação COS2007, apresentada no subcapítulo 2.8, acrescentando a distinção de cemitérios e atividade pecuária (vacarias). A introdução destes dois usos prende-se com o facto de as vacarias terem ocorrência significativa na zona, com maior ou menor dimensão, e no caso dos cemitérios pela sua especificidade e pelos impactes ambientais físicos relacionados com a contaminação do solo, das águas superficiais e subterrâneas (Young *et al.*, 2002; Barreira *et al.*, 2008; Oliveira *et al.*, 2013)

Tabela 6.45 - Valores do parâmetro uso do solo e respetivas classes de perigosidade do uso do solo (LU).

Uso do solo (LU)	Valor	Classe de perigosidade do uso do solo (LU)
Florestas	0	Extremamente baixa
Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea	0	
Zonas descobertas e com pouca vegetação	0	
Espaços verdes urbanos, equipamentos desportivos, culturais e de lazer, e zonas históricas	3	Muito baixa
Cemitérios	5	Baixa
Pecuária	6	Moderada a baixa
Áreas agrícolas heterogéneas	6	
Áreas de extração de inertes, áreas de deposição de resíduos e estaleiros de construção	7	Moderada a elevada
Culturas permanentes	7	Elevada
Culturas temporárias	8	
Tecido urbano	9	Muito elevada
Indústria, comércio e transportes	10	Extremamente elevada

O parâmetro N diz respeito à concentração de nitratos presente na água subterrânea. Elevadas concentrações de nitratos, normalmente indicam contaminação antrópica, associada a atividade agrícola (fertilizantes e adubos) e a poluição urbana (fossas sépticas). A aplicação prolongada e intensiva deste tipo de contaminante possibilita a sua lixiviação e introdução na água subterrânea. Outro poluente inerente à agricultura, e que pode ter impacte na qualidade da água, é o grupo de pesticidas que engloba herbicidas, inseticidas, fungicidas e nematicidas.

As classes de perigosidade relativas ao nitrato, definidas com base na sua concentração, e consideradas neste trabalho foram estabelecidas por Stigter (2005) e Stigter *et al.* (2006). Contempla um total de oito classes em que as três classes inferiores (extremamente baixa, muito baixa e baixa) foram definidas abaixo do valor paramétrico (50 mg/L) estabelecido no DL 306/2007 (Diário da República nº 164, 2007). Na Tabela 6.46 apresenta-se o intervalo de concentrações correspondente a cada classe, e acrescenta-se o respetivo valor proposto.

Tabela 6.46 - Valores da classe de perigosidade do nitrato.

Classe de perigosidade do nitrato (N)	NO ₃ (mg/L)	Valor
Extremamente baixa	≤ 10	1
Muito baixa	10 - 25	2
Baixa	25 - 50	3
Moderada a baixa	50 - 100	5
Moderada a elevada	100 - 150	7
Elevada	150 - 200	8
Muito elevada	200 - 300	9
Extremamente elevada	> 300	10

O índice de perigosidade (HI) é quantificado através da soma dos valores ponderados dos parâmetros RN, LU e N, com base na equação [6.8].

$$HI = 2 \times RN + 5 \times LU + 3 \times N \quad [6.8]$$

Os pesos de cada parâmetro resultam da proposta de Matias (2010), que considera o valor mais elevado para LU (5) por ser o mais importante, o que representa uma ameaça constante e que abrange a totalidade da área. A concentração de nitratos (N) tem um peso de 3 por corresponder a um fenómeno de temporalidade permanente e ponderação 2 para RN, um parâmetro de perigosidade não permanente. Tendo em conta as características das áreas em estudo, estes pesos ponderados estão perfeitamente adequados, tendo por isso sido adotados.

A Tabela 6.47 sintetiza a informação relativa aos intervalos e classes do índice de perigosidade (HI) estipuladas para as áreas de estudo.

Tabela 6.47 - Classificação do índice de perigosidade.

Índice de perigosidade (HI)	
Intervalos	Classe
[3-20]	Muito baixa
]20-40]	Baixa
]40-60]	Moderada
]60-80]	Elevada
]80-100]	Muito elevada

6.3.1 - Perigosidade na microbacia hidrográfica de Montouro

A quantificação do índice de perigosidade para a microbacia hidrográfica de Montouro, através do método RNLUN, produziu informação cartográfica de cada parâmetro reunida na Figura 6.24.

A perigosidade da rede viária principal e da rede viária não pavimentada, está representada na Figura 6.24 (a) e na Figura 6.24 (b), respetivamente, contribuindo para a perigosidade da rede viária cartografada na Figura 6.24 (c). Esta caracterização foi efetuada sobre uma base cartográfica de estradas nacionais, que sofreu atualização decorrente dos levantamentos de campo.

Os resultados denotam, cerca de, 10 % da área com perigosidade baixa, na ordem de, 43 % com perigosidade moderada, a classe dominante, aproximadamente 12 % na classe moderada a elevada e as classes superiores (perigosidade elevada e muito elevada) perfazem, cerca de, 35 % da área total, o que é um valor algo significativo (Tabela 6.48).

Tabela 6.48 - Valores da classe de perigosidade da rede viária na MhM.

Classe de perigosidade da RN	Valor	Área (km ²)	Área (%)
Baixa	1	0.6	9.6
Moderada	3	2.8	43.3
Moderada a elevada	5	0.8	12.1
Elevada	8	1.3	20.1
Muito elevada	10	1.0	15.0
Total		6.4	100.0

A caracterização do parâmetro LU, teve por base a informação compilada no subcapítulo 2.8, no entanto, foram implementadas correções/atualizações, relativas a áreas agrícolas e explorações pecuárias, procedentes de levantamento de campo. A combinação dos dois conjuntos de dados e posterior classificação levou à elaboração do mapa da Figura 6.24 (d).

A elevada ocupação florestal reflete-se nas classes de perigosidade do LU, com valor de, cerca de, 56 % da área na classe extremamente baixa. A perigosidade elevada e muito elevada está associada às áreas mais urbanas, com aproximadamente 25 %, estando os, cerca de, 18 % dispersos por classe de perigosidade moderada a elevada (Tabela 6.49).

Tabela 6.49 - Valores da classe de perigosidade do uso e ocupação do solo na MhM.

Classe de perigosidade do LU	Valor	Área (km ²)	Área (%)
Extremamente baixa	0	3.6	56.4
Moderada a baixa	6	0.8	12.2
Moderada a elevada	7	0.4	6.0
Elevada	8	1.3	20.9
Muito elevada	9	0.3	4.5
Total		6.4	100.0

A classificação do parâmetro N considerou os dados da análise química do nitrato, apresentados no subcapítulo 5.2.2. Estes dados pontuais foram interpolados para a área da microbacia, através do método IDW (Inverso da Distância - Inverse Distance Weighted) e, posteriormente, cada um dos intervalos de concentração de nitratos (como definidos na Tabela 6.46) foi reclassificado, sendo a sua distribuição espacial possível de ser visualizada na Figura 6.24 (e).

Os resultados percentuais da área pertencente a cada classe estão sintetizados na Tabela 6.50. Sobressai a ocupação de, cerca de, 57 % da área pela classe moderada a baixa, seguida de, aproximadamente, 20 % da classe baixa, na ordem de, 13 % para as classes moderada a muito elevada e cerca de 10 % na classe muito baixa a extremamente baixa.

Tabela 6.50 - Valores da classe de perigosidade do nitrato na MhM.

Classe de perigosidade do N	Valor	Área (km ²)	Área (%)
Extremamente baixa	1	0.1	1.1
Muito baixa	2	0.5	8.5
Baixa	3	1.3	20.5
Moderada a baixa	5	3.7	57.3
Moderada a elevada	7	0.4	6.9
Elevada	8	0.3	4.0
Muito elevada	9	0.1	1.7
Total		6.4	100.0

A representação espacial do índice de perigosidade (HI) é apresentada na Figura 6.24 (f) e tem valores entre 9 e 92. Constata-se que a perigosidade muito elevada é residual, com, aproximadamente, 1 % de ocupação, no entanto, a classe elevada e moderada existem em, cerca de, 43 % da área, com uma ocupação predominante nas zonas de recarga, o que poderá ser preocupante. Finalmente, a classe de perigosidade baixa e muito baixa ocorrem em, cerca de, 37 % e 19 %, respetivamente. A Tabela 6.51 resume estes resultados do HI.

Tabela 6.51 - Valores da classe do índice de perigosidade na MhM.

Classe de HI	Área (km ²)	Área (%)
Muito baixa	1.2	19.2
Baixa	2.4	37.1
Moderada	1.0	15.5
Elevada	1.7	27.0
Muito elevada	0.1	1.2
Total	6.4	100.0

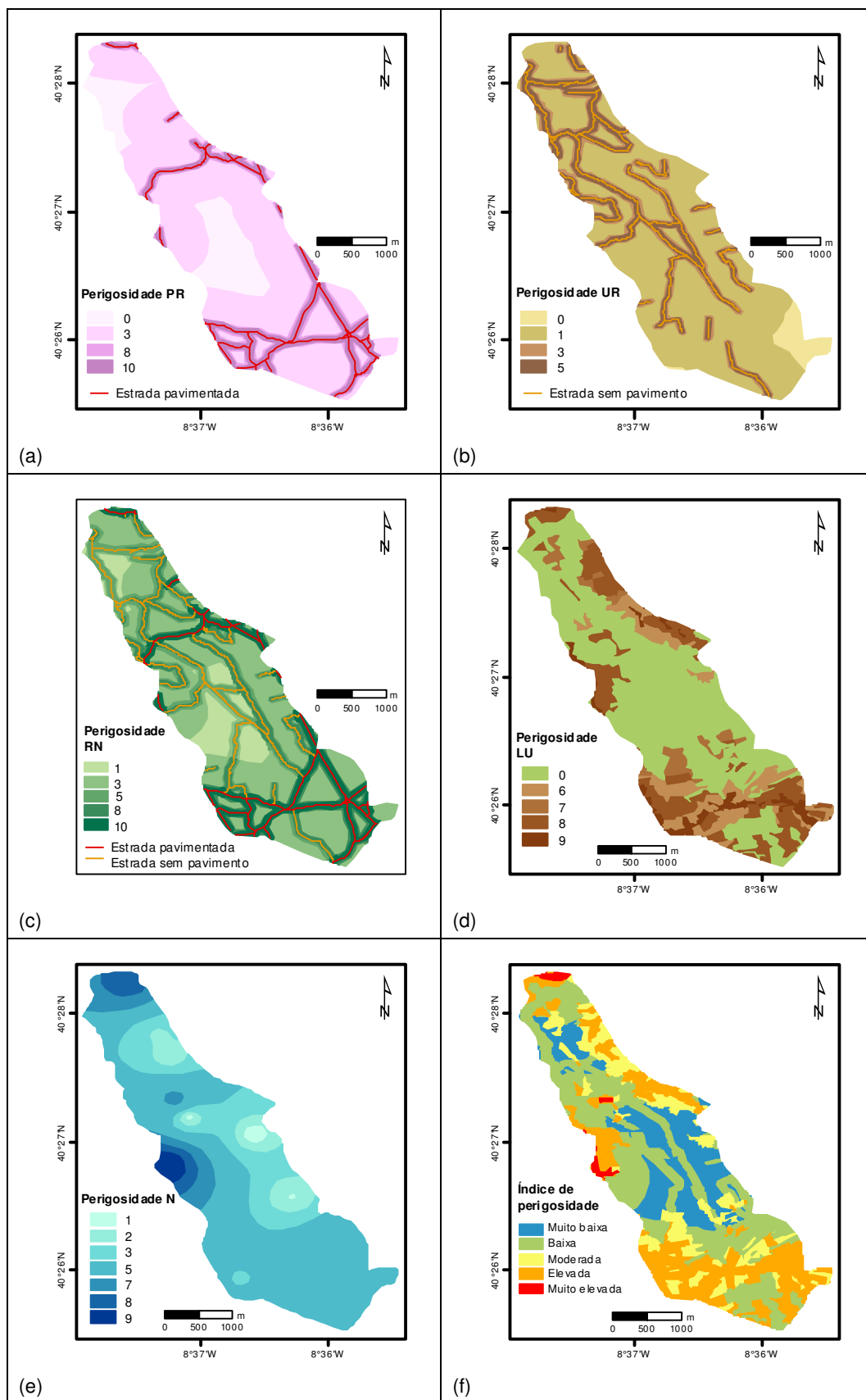


Figura 6.24 - Mapas de caracterização da perigosidade: PR (a), UR (b), RN (c), LU (d), N (e) e HI (f), na MhM.

6.3.2 - Perigosidade na bacia hidrográfica de Fervença

A avaliação do índice de perigosidade na bacia hidrográfica de Fervença recorreu à utilização da metodologia RNLUN.

A perigosidade associada à rede viária varia entre as classes muito baixa e muito elevada, tendo distribuição de, cerca de, 5 % a perigosidade muito baixa a baixa, predomina a perigosidade moderada com, aproximadamente, 48 %, a classe moderada a elevada apresenta, cerca de, 8 % e as classes elevada e muito elevada com, cerca de, 18 % e 20 %, respetivamente (Tabela 6.52).

Estes resultados são consequência das classificações parciais da perigosidade associada à rede viária principal (Figura 6.25 (a)) e à rede viária não pavimentada (Figura 6.25 (b)). A base cartográfica da rede viária foi atualizada mediante levantamento de campo.

O mapeamento da rede viária e da sua perigosidade pode ser observado na Figura 6.25 (c).

Tabela 6.52 - Valores da classe de perigosidade da rede viária na BhF.

Classe de perigosidade da RN	Valor	Área (km ²)	Área (%)
Muito baixa	0	0.001	0.001
Baixa	1	3.072	5.022
Moderada	3	29.652	48.471
Moderada a elevada	5	5.024	8.213
Elevada	8	11.272	18.426
Muito elevada	10	12.154	19.867
Total		61.2	100.0

A tipologia inicial do parâmetro LU foi sintetizada no subcapítulo 2.8, tendo-se procedido a introdução de informação (explorações pecuárias, estufas, atividade industrial, deposição de resíduos, entre outros) com base nos levantamentos *in situ*. A atribuição dos respetivos valores possibilitou a preparação do mapa da Figura 6.25 (d), onde se constata a presença de atividades antropogénicas relacionadas com os valores mais elevados, bem como a existência da classe nula em grande escala, reflexo da grande ocupação florestal. Os resultados da Tabela 6.53 denotam isso mesmo, com, aproximadamente, 53 % da área relativa à classe extremamente baixa, cerca de, 26 % da classe elevada, áreas semelhantes nas classes moderada a baixa e muito elevada (aproximadamente, 8 %) e as restantes classes com ocupação pouco expressiva.

Relativamente ao parâmetro N (resultados compilados no subcapítulo 5.2.2), começou por se fazer interpolação das medições pontuais através do método IDW, seguindo-se a classificação do parâmetro e o seu mapeamento (Figura 6.25 (e)). As áreas correspondem maioritariamente às classes baixa e moderada a baixa, com, cerca de, 38 % e 42 %, respetivamente. As classes muito baixa e extremamente baixa ocupam, aproximadamente, 13 % da área total e as classes mais elevadas registam, cerca, de 7 %. Estes resultados podem ser consultados na Tabela 6.54.

Tabela 6.53 - Valores da classe de perigosidade do uso e ocupação do solo na BhF.

Classe de perigosidade do LU	Valor	Área (km ²)	Área (%)
Extremamente baixa	0	32.58	53.26
Muito baixa	3	0.05	0.09
Baixa	5	0.02	0.02
Moderada a baixa	6	4.75	7.77
Moderada a elevada	7	2.42	3.95
Elevada	8	15.87	25.95
Muito elevada	9	5.17	8.45
Extremamente elevada	10	0.31	0.51
Total		61.2	100.0

Tabela 6.54 - Valores da classe de perigosidade do nitrato na BhF.

Classe de perigosidade do N	Valor	Área (km ²)	Área (%)
Extremamente baixa	1	1.4	2.3
Muito baixa	2	6.5	10.6
Baixa	3	23.1	37.7
Moderada a baixa	5	26.0	42.5
Moderada a elevada	7	4.0	6.6
Elevada	8	0.2	0.3
Total		61.2	100.0

O índice de perigosidade (HI) da bacia hidrográfica de Ferveça varia entre 5 e 91 e apresenta, aproximadamente, 20 % da área com classe muito baixa, cerca de, 33 % da classe baixa, na ordem de, 16 % da classe moderada, cerca de, 29 % da classe elevada e próximo de 1 % para a classe muito elevada (Tabela 6.55). O mapeamento destas áreas pode ser visualizado na Figura 6.25 (f).

Tabela 6.55 - Valores da classe do índice de perigosidade na BhF.

Classe de HI	Área (km ²)	Área (%)
Muito baixa	12.2	19.9
Baixa	20.3	33.2
Moderada	10.0	16.3
Elevada	18.0	29.4
Muito elevada	0.8	1.2
Total	61.2	100.0

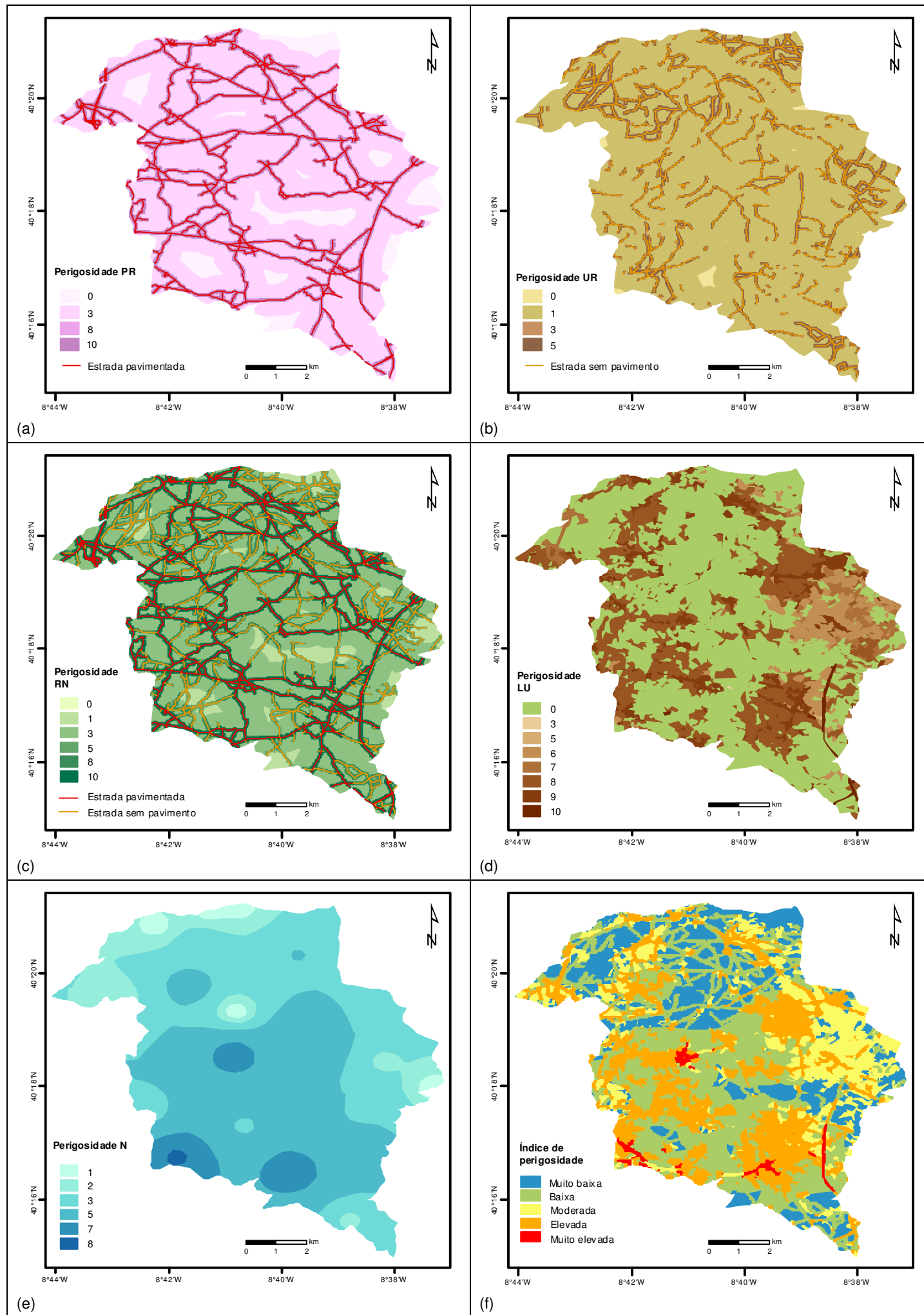


Figura 6.25 - Mapas de caracterização da perigosidade: PR (a), UR (b), RN (c), LU (d), N (e) e HI (f), na BhF.

6.4 - Mapeamento do risco nas áreas de estudo

A avaliação do risco de poluição da água subterrânea pressupõe a conjugação da vulnerabilidade intrínseca com a perigosidade. Alguns autores (Ribeiro, 2000; Panagopoulos *et al.*, 2006; Antonakos & Lambrakis, 2007) ao efetuarem alterações ao índice de vulnerabilidade intrínseca, com a introdução de parâmetros de perigosidade, quantificam de imediato a vulnerabilidade específica (VE) ou o risco de poluição.

Neste trabalho, optou-se por fazer separadamente a quantificação da vulnerabilidade intrínseca (VI) e do índice de perigosidade (HI) para, posteriormente, se calcular o índice de risco (RI), conforme esquema da Figura 6.26.

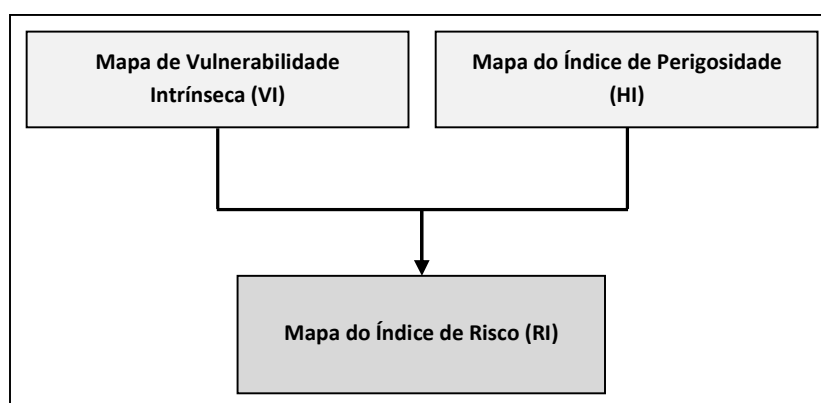


Figura 6.26 - Esquema geral da metodologia para determinação do índice de risco (RI).

Propõe-se a determinação do índice de risco (RI) através da soma ponderada da vulnerabilidade intrínseca (VI) com o índice de perigosidade (HI), através da equação [6.9].

$$RI = 0.5 \times VI + 0.5 \times HI \quad [6.9]$$

No entanto, a utilização desta equação implica que ambos os índices, VI e HI, se encontrem em escalas relativas (Hötzl *et al.*, 2004) e, quando tal não acontece, é necessário efetuar a respetiva normalização (X_{norm}) recorrendo à equação [6.10], em que X corresponde ao valor do índice e X_{min} e X_{max} , respetivamente, ao valor mínimo e máximo do índice.

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad [6.10]$$

Na Tabela 6.56 apresenta-se a síntese da proposta de classes do índice de risco, desde um risco mínimo ou muito baixo a um risco máximo ou muito elevado, de acordo com os intervalos definidos.

Tabela 6.56 - Classificação do índice de risco (RI).

Índice de risco (RI)	
Intervalos	Classe
[0-0.2]	Muito baixo
]0.2-0.4]	Baixo
]0.4-0.6]	Moderado
]0.6-0.8]	Elevado
]0.8-1.0]	Muito elevado

6.4.1 - Risco na microbacia hidrográfica de Montouro

Para a elaboração da carta de risco para a microbacia hidrográfica de Montouro, recorreu-se à utilização dos resultados de VI obtidos através do índice DRASTIC-SA modificado. A escolha por este índice baseou-se no facto da correlação de Spearman (0.41) ser na mesma ordem de grandeza da máxima (0.43), considerando-se simultaneamente melhorado, representativo e que tem os mais altos valores de VI.

Os índices de vulnerabilidade intrínseca e de perigosidade foram normalizados e procedeu-se ao cálculo do RI, que apresenta resultados entre 0.19 e 0.81 e cujo mapeamento se pode visualizar na Figura 6.27 (a). O índice de risco muito baixo e muito elevado distribuem-se quase pontualmente, não tendo expressão. As classes de risco baixo, moderado e elevado ocorrem em, cerca de, 40 %, 36 % e 24 % da área, respetivamente (Figura 6.27 (b)).

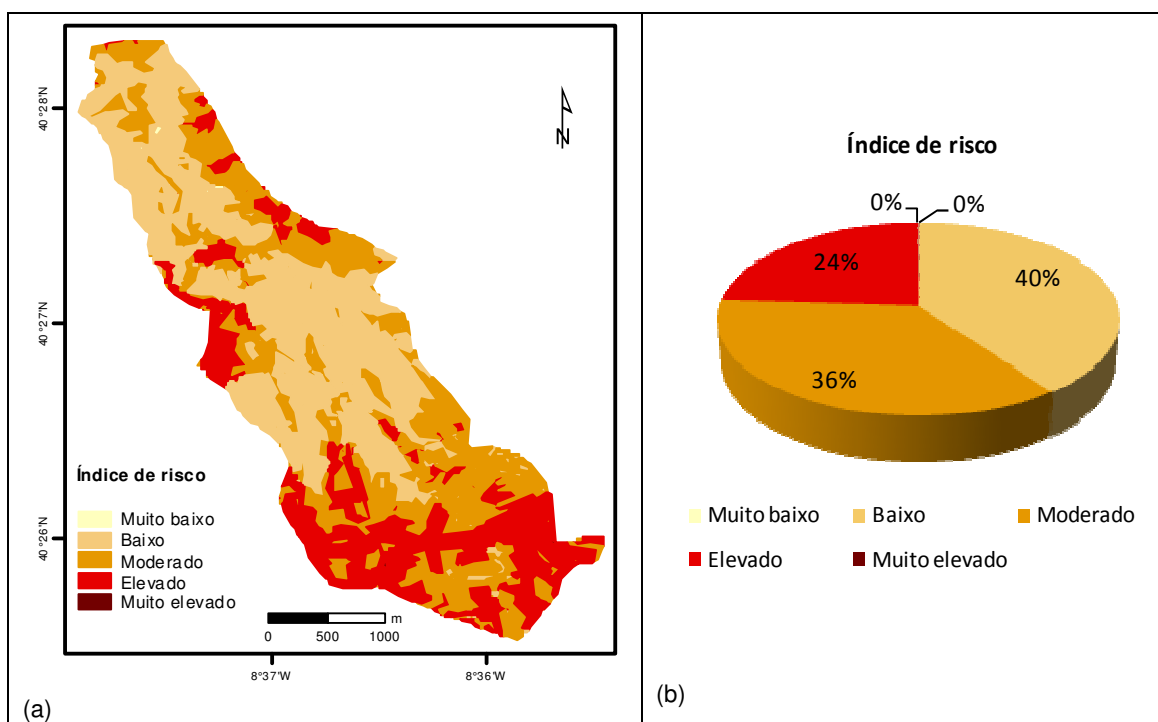


Figura 6.27 - Mapa do índice de risco (a) e valores percentuais das áreas do RI (b), na MhM.

A análise do mapa de risco da MhM permite constatar os seguintes factos: (1) o risco é maioritariamente baixo a moderado, correspondendo em grande parte à ocupação florestal e a alguma agricultura, normalmente de subsistência; (2) o RI elevado ocorre a S e, sensivelmente, na zona central da microbacia hidrográfica do lado E e O, locais coincidentes com as áreas urbanas e, ao mesmo tempo, com as áreas de maior vulnerabilidade e com áreas favoráveis à recarga, identificadas no subcapítulo 4.4.1.

Na área abrangida pela MhM não existem, atualmente, atividades industriais e a ocupação urbana, com as especificidades que lhe são próprias, constitui o fator de maior perigosidade. Por exemplo, é de referir que, recentemente (2012), se verificou a entrada em funcionamento do saneamento de águas residuais domésticas (Inova-EEM, 2013b). Esta medida, seguida das efetivas ligações domiciliárias, vem contribuir para a redução da carga potencial de poluentes, que se registariam à data do trabalho de campo, uma vez que o sistema ainda não existia ou encontrava-se em obras.

6.4.2 - Risco na bacia hidrográfica de Fervença

A carta de risco para a BhF teve por base a carta de vulnerabilidade intrínseca determinada através da metodologia DRASTIC-SA, por se considerar que os resultados deste índice retratam as características da área de estudo e tendo em conta que, no geral, as correlações de Spearman se revelaram baixas, não constituíram, por isso, um elemento decisor.

Após a normalização dos valores do VI e do HI determinou-se o índice de risco, que evidencia resultados entre 0.15 e 0.84, relativos a classe de risco muito baixo a muito elevado. A Figura 6.28 (a) apresenta a representação espacial deste parâmetro e a Figura 6.28 (b) contém os valores percentuais das áreas ocupadas por cada classe de risco.

As classes extremas de risco muito baixo e muito elevado abrangem áreas reduzidas com, cerca de, 1 % e 0 %, respetivamente. Predomina o risco moderado numa área de, aproximadamente, 44 %, seguindo-se o risco baixo que ocupa, cerca de, 29 % do espaço territorial e os restantes, cerca de, 26 % correspondem a risco elevado.

As zonas de risco moderado a baixo estão, essencialmente, associadas à ocupação florestal, enquanto os níveis mais elevados de risco estão identificados para os locais de maior concentração de perigosidade, nomeadamente zonas urbanas, de atividade industrial e agrícola, e aos quais correspondem também algumas classes de vulnerabilidade mais alta.

Tendo em conta o sentido de escoamento subterrâneo e as respetivas zonas de recarga (apresentados nos subcapítulos 4.3.2 e 4.4.2, respetivamente), os setores NE e SE da bacia hidrográfica revelam-se como particularmente sensíveis e onde o risco potencial denota focos de classe elevada. Nestes focos de classe elevada tem-se a presença de depósitos quaternários e algumas formações cretácicas que, se por um lado funcionam como proteção ao sistema carsificado, por outro, dada a elevada permeabilidade, são favoráveis e facilitadores da infiltração. O risco existe e a capacidade “protetora” (natural) do aquífero inferior depende em grande medida da capacidade de depuração que este “filtro” poderá promover. De salientar, ainda, o facto de as formações carsificadas ocorrerem à superfície em pequena extensão e que algumas unidades aflorantes, apesar de carbonatadas, têm composição margosa que confere alguma proteção natural ao sistema cársico, o que é evidenciado pelas zonas de risco moderado a baixo.

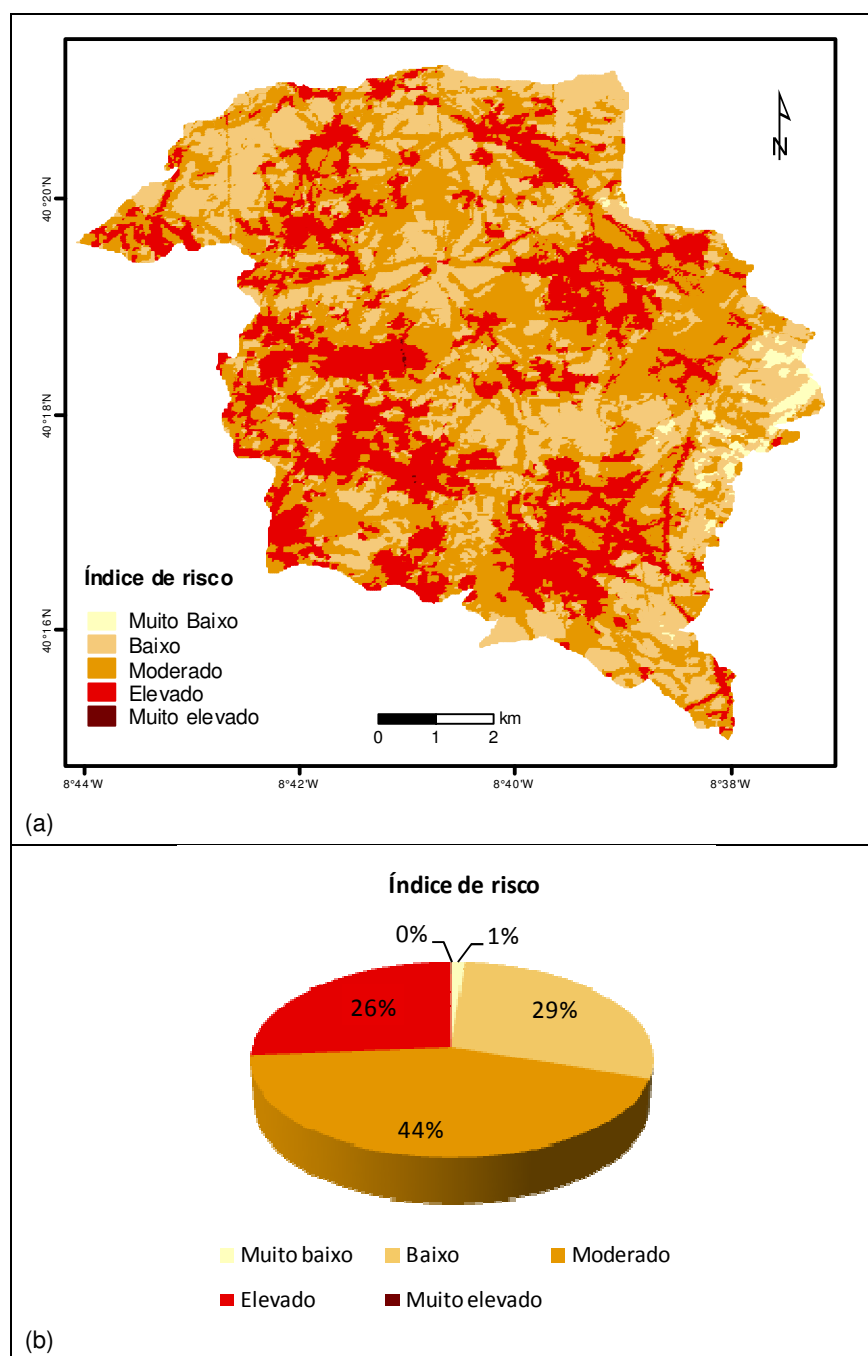


Figura 6.28 - Mapa do índice de risco (a) e valores percentuais das áreas do RI (b), na BhF.

A área da bacia hidrográfica de Ferverença revela a presença de várias povoações, constituindo uma ocupação urbana dispersa e com risco elevado associado, como referido. Estes locais não possuíam sistema de saneamento de águas residuais domésticas, o qual tem vindo a ser construído nos últimos anos integrado na rede de saneamento dos municípios de Cantanhede (Inova-EEM, 2009; 2010; 2011; 2012b; 2013b; 2014b) e de Montemor-o-Velho (CMMV, 2011; 2012; 2013), o que se traduz numa possível redução da probabilidade de ocorrência deste tipo de perigosidade.

6.4.3 - Análise comparativa do risco entre as áreas de estudo

A normalização dos valores de vulnerabilidade intrínseca, perigosidade e risco possibilita uma comparação entre áreas e/ou métodos distintos.

A microbacia hidrográfica de Montouro e a bacia hidrográfica de Ferverença revelam semelhanças nas classes do índice de risco, predominando o risco baixo a moderado, com distribuição espacial em, cerca de, 76 % e 73 %, respetivamente.

A ocupação com as atividades humanas, que se reflete no índice de perigosidade, revela analogias, mas simultaneamente diferenças. Ambas as zonas têm características rurais, apresentando significativas áreas florestais e agrícolas, no entanto, a área da BhF tem atividade agrícola, agropecuária ou pecuária mais desenvolvida ou intensiva, acrescendo ainda o facto de existirem algumas atividades industriais dispersas. As áreas urbanas constituem focos de perigosidade mais elevada, associadas também com a existência de rede viária (que na BhF é mais densa comparativamente à área da MhM).

Hidrogeologicamente, os locais de estudo têm enquadramentos diferentes, caso do Sistema cársico na bacia hidrográfica de Ferverença, mas ao mesmo tempo identificam-se analogias evidenciadas pela forte presença de depósitos quaternários que de algum modo estarão a influenciar e a aproximar os resultados dos índices de vulnerabilidade intrínseca, como se constata dos valores normalizados da Figura 6.29 e, conseqüentemente, também os resultados de RI.

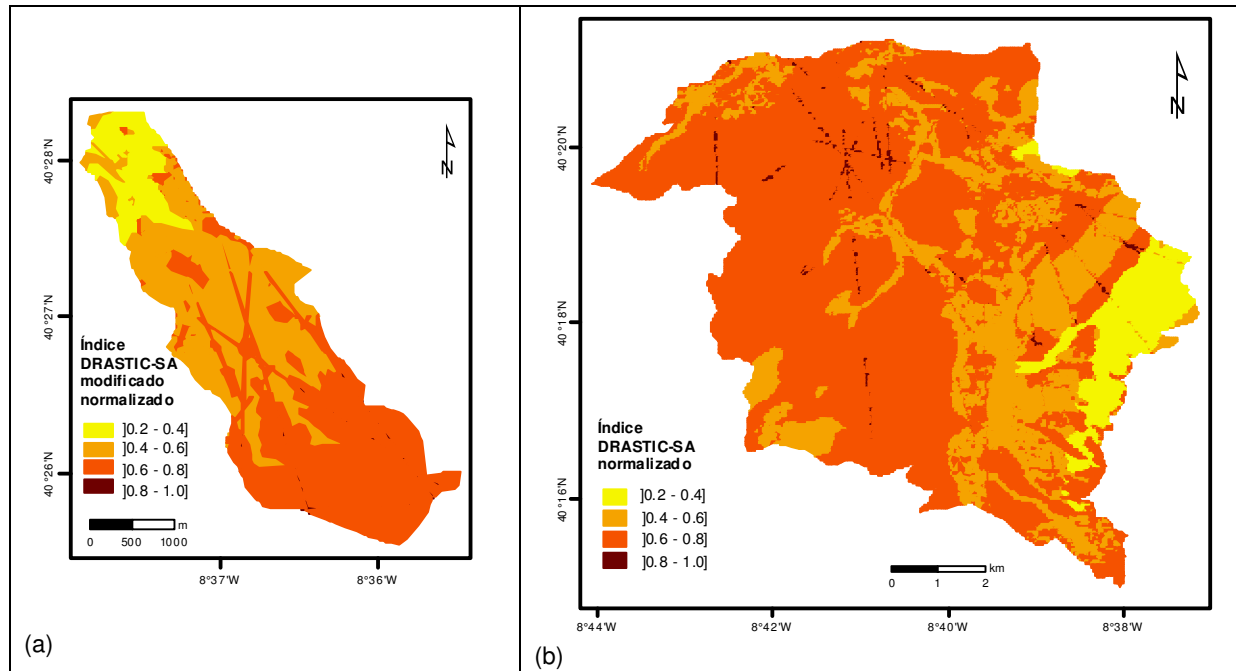


Figura 6.29 - Mapas normalizados do índice de vulnerabilidade da MhM (a) e da BhF (b).

6.5 - Medidas de minimização do risco

A caracterização da vulnerabilidade intrínseca nas áreas em estudo revelou a existência de zonas altamente vulneráveis, onde existem fatores de perigosidade potenciando e elevando o risco de contaminação. A conjugação entre vulnerabilidade e o desenvolvimento de um episódio de perigosidade, mais ou menos grave, pode desencadear a contaminação da água subterrânea, inclusive em locais onde tal poderia ser menos expectável. O conhecimento destes elementos, aliado à consulta dos respetivos mapas (vulnerabilidade, perigosidade e risco), constitui uma contribuição relevante para o ordenamento do território e para uma possível revisão do Plano Diretor dos municípios envolvidos.

A existência e identificação de um conjunto de perigos revelam-se uma fonte de informação útil, que poderá ser usada na prevenção, no entanto, a ocasionalidade de determinados fenómenos pode sempre constituir um fator surpresa.

O presente capítulo tem como objetivo deixar algumas linhas orientadoras de medidas que poderão ajudar à minimização do risco de contaminação, promovendo uma interação mais sustentável entre recurso hídrico e uso e ocupação humana, que será inevitável.

Considerando as áreas em estudo, e respetivas especificidades, indicam-se as seguintes medidas (sem pretender ser uma listagem exaustiva):

- promover campanhas de sensibilização das populações para redução/racionalização da utilização de fertilizantes, pesticidas, etc.;
- recomendar a seleção adequada do tipo de fertilizantes, pesticidas, etc.;
- aconselhar a correta eliminação das embalagens vazias dos produtos utilizados (foi observada a presença deste tipo de embalagens nos terrenos e inclusive dentro de poços);
- incentivar à rotatividade da produção agrícola, sempre que possível;
- alertar para os perigos associados ao entulhamento de pontos de água com materiais inadequados (lixos, por exemplo);
- promover práticas de agricultura biológica;
- fiscalizar possíveis descargas ilegais de resíduos, decorrentes de atividades industriais, pecuárias, etc.;
- fomentar uma política de informação/consciencialização das consequências dos perigos para a água subterrânea;
- recolher/tratar de forma adequada as águas de escorrência das principais estradas;
- inventariar as unidades industriais dispersas pela região e, de acordo com o grau de perigosidade associado, incentivar à deslocalização para parques industriais;
- promover e incentivar as ligações à rede de saneamento, com a respetiva selagem das fossas sépticas;
- instalar uma rede de monitorização da qualidade da água subterrânea.

Estas sugestões pretendem induzir a minimização/atenuação da adição de poluentes aos solos, possibilitando que estes de forma natural promovam a atenuação das cargas contaminantes e se regenerem, reduzindo a incorporação de elementos poluentes na água subterrânea.

Capítulo 7 - Considerações finais

Este trabalho de investigação no âmbito dos Recursos Hídricos e da Hidrogeologia, iniciou-se com o estudo da nascente de água mineralizada de Montouro, procurando aprofundar o conhecimento sobre a mesma e, nomeadamente, contribuir para o esclarecimento da sua origem. Na região enquadrante não se conhece outra água com quimismo semelhante, tendo-lhe sido reconhecidas propriedades terapêuticas. É uma nascente que ocorre em formações sedimentares porosas, contudo o aquífero associado deverá situar-se em domínios profundos onde, para além de formações siliciclásticas, ocorrem rochas sedimentares carbonatadas e evaporíticas.

Na região existe outra nascente merecedora de registo, não pelas elevadas mineralizações da água emergente, mas pelos elevados caudais que favorecem a sua exploração para produção de água para consumo humano. É o caso de Olhos da Ferverça, cuja ocorrência está relacionada com formações sedimentares carbonatadas e carsificadas.

As atividades de investigação desenvolvidas nas duas exurgências e nas áreas de estudo envolventes e definidas neste trabalho, i.e., microbacia hidrográfica de Montouro e bacia hidrográfica de Ferverça, pretendem contribuir para o melhor conhecimento hidrogeológico e hidroquímico destes domínios, bem como para a avaliação da sua vulnerabilidade intrínseca, da perigosidade e do risco.

Os resultados obtidos durante o trabalho desenvolvido, permitem indicar as seguintes conclusões para a MhM:

- (1) A prospeção eletromagnética possibilitou identificar, localmente, alinhamentos estruturais hidraulicamente condutivos com direção predominantemente NW-SE, estando um desses alinhamentos diretamente relacionado com a exurgência de Montouro, indiciando a origem profunda da água;
- (2) O escoamento subterrâneo no aquífero freático local tem direção preferencial de ESE para WNW, o que denota a influência da topografia e de elementos estruturais, como a atitude regional da estratificação (NS, mergulhante para W) e a presença de fraturas NW-SE de natureza regional e local;
- (3) A recarga da unidade aquífera freática ocorrerá maioritariamente nos sectores sul e central da microbacia hidrográfica, nas faixas topograficamente aplanadas e ocupadas com as formações detríticas permeáveis;
- (4) A unidade aquífera associada à nascente de Montouro pertencerá ao Sistema aquífero Cretácico de Aveiro (O2). O armazenamento e a circulação hídricos nesta unidade evoluirão na base das Formações Grés de Furadouro e Grés de Oiã; a Formação carbonatada subjacente, Calcários da Mamarrosa funcionará como muro da unidade aquífera;
- (5) A exurgência de Montouro é um ponto de descarga natural e a sua localização estará determinada pela passagem de uma falha regional profunda com orientação NE-SW que, intersetada por fraturação local NW-SE, promove a emergência artesiana da água;
- (6) A elevada mineralização da água de Montouro confirma os circuitos de circulação profundos e a expressiva interação água-rocha, com possíveis formações evaporíticas

existentes na base ou nas proximidades da base das formações aquíferas. É o caso dos depósitos evaporíticos do Hetangiano, que podem também ocorrer em níveis superiores como resultado da intrusão ascendente dos sais através das falhas (Mendonça *et al.*, 2004);

- (7) A estimativa da recarga aquífera média anual na MhM é de 170 mm, correspondente a, cerca de, 18 % da precipitação atmosférica anual;
- (8) A condutividade elétrica específica da água da nascente de Montouro é em média, cerca de, 4 a 6 vezes superior à das restantes águas subterrâneas da microbacia hidrográfica e os resultados das análises químicas da água da nascente confirmam a presença de altas concentrações iónicas com destaque para os catiões sódio (Na), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e os aniões cloreto (Cl), sulfato (SO₄) e bicarbonato (HCO₃);
- (9) A água mineralizada da nascente de Montouro apresenta fácies hidrogeoquímica cloretada sódico-magnésico-cálcica e demonstra estabilidade do quimismo ao longo de mais de 100 anos;
- (10) Os índices DRASTIC e DRASTIC pesticidas determinados apontam para uma maior vulnerabilidade intrínseca nas zonas de afloramento das formações quaternárias (locais de recarga da unidade aquífera);
- (11) O mapa de risco da MhM identifica a ocorrência de risco maioritariamente baixo a moderado relativo às zonas de ocupação florestal e de alguma agricultura, e risco elevado nos locais de áreas urbanas e, ao mesmo tempo, coincidente com as áreas de maior vulnerabilidade e mais favoráveis à recarga.

Resumidamente, as principais conclusões obtidas no decorrer deste estudo para a BhF são as seguintes:

- (1) A prospeção eletromagnética no domínio do tempo, realizada nas envolventes da exurgência, inferiu a presença de blocos resistivos a pouca profundidade que corresponderão a calcários margosos (J^{1_{et}}) que se sobrepõem a calcários dolomíticos (J^{1_{cd}}), mais condutivos e que alojarão a unidade aquífera responsável pela exurgência;
- (2) Os alinhamentos estruturais inferidos pela prospeção geofísica acrescentaram a pormenorização daquelas estruturas nas imediações da exurgência;
- (3) Existência de um sistema hidrogeológico mais próximo da superfície, que engloba unidades aquíferas sobrepostas, pertencentes aos Sistemas aquíferos Quaternário de Aveiro (O1), Tentúgal (O5) e Viso - Queridas (O30) e de um sistema mais profundo constituído por formações carbonatadas do Sistema aquífero Cárstico da Bairrada (O3);
- (4) O escoamento subterrâneo no sistema Quaternário/Cretácico ocorre com uma direção, sensivelmente, de S para N no lado oeste da BhF e de ESE para WNW no setor E, enquanto o sistema cárstico tem um escoamento subterrâneo preferencial de ESE para WNW, denotando a influência do anticlinal de Cantanhede;

- (5) A recarga do Sistema aquífero Quaternário/Cretácico ocorrerá na zona W e SE da bacia hidrográfica, enquanto a recarga do Sistema aquífero cársico será na zona E da BhF e através de processos de drenância a partir das unidades superiores;
- (6) A estimativa da recarga aquífera média anual é de, cerca de, 340 mm para o Cársico da Bairrada (O3) e de, cerca de, 203 mm para as unidades aquíferas do Quaternário e Cretácico (O1, O5 e O30), o que equivale a 35 e 21 % da precipitação atmosférica anual, respetivamente;
- (7) As águas subterrâneas da bacia hidrográfica evidenciam um predomínio da fácies bicarbonatada cálcica, denotando uma clara influência das formações carbonatadas, e muito semelhantes à que emerge em Olhos da Fervença, enquanto que as restantes águas amostradas são de fácies sulfatada e/ou cloretada cálcica, por vezes bicarbonatada;
- (8) Os índices DRASTIC e DRASTIC pesticidas, denotam vulnerabilidade intrínseca significativa em grande parte da área, nomeadamente nos locais de afloramento dos materiais quaternários e das formações carsificadas;
- (9) O método COP, aplicado ao Sistema aquífero cársico, revelou vulnerabilidade intrínseca mais elevada nos locais de afloramento das unidades carsificadas e menor vulnerabilidade intrínseca nos locais com material de recobrimento (denotando alguma proteção do aquífero cársico);
- (10) As zonas de risco moderado a baixo estão associadas à ocupação florestal e os níveis mais elevados de risco estão relacionados com os locais de maior concentração de domínios com perigosidade expressa, como zonas urbanas, de atividade industrial e agrícola, e que correspondem a algumas classes de vulnerabilidade mais alta.

Algumas das conclusões são relativas ao conjunto das duas bacias hidrográficas em estudo e sistematizam-se em seguida:

- (1) A deteção de alinhamentos estruturais através da interpretação do modelo digital do terreno demonstrou a existência de famílias de alinhamentos preferenciais;
- (2) A estimativa da recarga aquífera pelos métodos de Penman-Grindley e de balanço de massa de cloretos, revelou-se melhor do que a obtida pelo método do balanço de cloretos;
- (3) Os erros de precisão das medições dos parâmetros físico-químicos são inferiores a 10 %, maioritariamente inferiores a 5 %;
- (4) O cálculo da condição de eletroneutralidade revelou balanços elétricos com erros de fecho inferiores a 5 % em 83 % das amostras na campanha de 2011 e em 55 % das amostras na campanha de 2012, com a restante percentagem a situar-se no intervalo de 5 a 10 %;
- (5) O balanço elétrico teve resultado positivo na maioria das amostras, evidenciando uma deteção por defeito dos aniões ou a presença de algum elemento não quantificado, mas que não comprometeu a utilização dos resultados;

- (6) Os processos hidrogeoquímicos identificados nas bacias hidrográficas incluem a formação de águas do tipo $\text{Ca}-(\text{HCO}_3)_2$ resultado da dissolução de carbonatos; a dissolução de minerais de gesso e anidrite criam condições para o desenvolvimento de águas de fácies $\text{Ca}-\text{SO}_4$; a redução do ião sulfato leva à formação de águas do tipo $\text{Ca}-(\text{HCO}_3)_2$; e o enriquecimento em Cl, proveniente da dissolução de halite, conjugado com processos de absorção de Na, favorecem a formação de águas de fácies $\text{Ca}-\text{Cl}_2$;
- (7) As águas das exurgências de Montouro e de Olhos da Fervença apresentam menores teores de trítio e correspondem às águas mais antigas e com tempo de residência mais prolongado, indicando uma idade máxima de, cerca de, 35 e 33 anos, respetivamente;
- (8) Em ambas as áreas de estudo o parâmetro da análise estrutural (SA) apresenta predomínio das classes inferiores, no entanto, sobressaem locais de classes mais elevadas, sendo potenciais contribuintes para o aumento da vulnerabilidade intrínseca;
- (9) Na análise da vulnerabilidade intrínseca, a correlação entre nitratos e o parâmetro SA revelou melhores resultados na MhM do que na BhF, considerando o método de calibração com base na concentração de nitratos;
- (10) A avaliação do índice de perigosidade pelo método modificado RNLUN mostrou-se adequada às características das duas bacias hidrográficas.

7.1 - Trabalhos futuros

A conclusão deste trabalho não finaliza o estudo hidrogeológico e do risco de contaminação nas áreas em análise, pelo contrário, evidencia novas possibilidades de investigação, bem como melhorias que se poderão implementar no sentido de obter uma caracterização ainda mais completa dos Sistemas aquíferos.

Sem carácter exaustivo, deixam-se como propostas:

- execução de piezómetros, uma vez que é impraticável fazer bombagens de poços com volumetria tão grande (resultado dos grandes diâmetros e profundidades);
- medição piezométrica em maior número de pontos de água, refinando a representação da direção de fluxo;
- alargar o trabalho a bacias hidrográficas vizinhas, concretamente em MhM, possibilitando, por exemplo, saber se existe recarga entre bacias hidrográficas;
- realizar análises químicas das águas considerando a determinação da concentração do ião silício;
- monitorização da água da chuva para determinar a sua quantidade, bem como fazer a sua análise química, de modo a perceber a influência da distância à costa e melhorar a estimativa da recarga;
- determinação do teor em trítio da água da chuva e, simultaneamente, repetir a quantificação deste parâmetro nas águas das exurgências;
- realização de ensaios com traçadores, por forma a conhecer melhor o Sistema aquífero cársico;

- continuar os trabalhos de geofísica, no domínio tempo e frequência, por forma a definir melhor a continuidade da fracturação;
- testar outros métodos de avaliação da vulnerabilidade intrínseca, ou variantes desses métodos, refinando-os e adequando-os às características das áreas em estudo;
- proceder à calibração dos métodos de avaliação da vulnerabilidade intrínseca, no entanto, usando outros poluentes para além dos nitratos, por exemplo, pesticidas ou metais pesados (o que implica a realização de análises deste tipo de poluentes);
- avaliar o risco das massas de água subterrâneas e estimar os impactes para a saúde humana, considerando a relação entre concentrações e exposição.

Bibliografia

- Acciaiuoli, L.M.C. (1944). Águas de Portugal minerais e de mesa: história e bibliografia, vol V. Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos, Lisboa, pp. 89-90.
- Acciaiuoli, L.M.C. (1947). Hidrologia Portuguesa 1943-1946. Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos, Lisboa, pp. 99-103.
- Acciaiuoli, L.M.C. (1952). Le Portugal Hydromineral, vol I. Direction Generale des Mines et des Services Geologiques, Lisbonne, pp. 94, 196 e 276.
- Acciaiuoli, L.M.C. (1953). Le Portugal Hydromineral, vol II. Direction Generale des Mines et des Services Geologiques, Lisbonne, pp. 112-113 e 401.
- Adams, S.; Titus, R.; Pietersen, K.; Tredoux, G.; Harris, C. (2001). Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa. *Journal of Hydrology*, vol 241 (1-2). Elsevier, pp. 91-103. www.elsevier.com/locate/jhydrol
- Afonso, M.J.; Pires, A.; Chaminé, H.I.; Marques, J.M.; Guimarães, L.; Guilhermino, L.; Rocha, F.T. (2010). Aquifer vulnerability assessment of urban areas using a GIS-based cartography: Paranhos groundwater pilot site, Porto, NW Portugal. In: B.S. Paliwal (Editor). *Global Groundwater Resources and Management - Selected papers from The 33rd International Geological Congress, General Symposium: Hydrogeology*, Oslo (Norway) aug. 2008. Scientific Publishers, Jodhpur, India, pp. 259-278.
- Albinet, M. (1970). Les cartes de vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Document 70 SGN 325 HYD, BRGM - Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France, 20 pp.
- Albinet, M.; Margat, J. (1970). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bulletin BRGM deuxième série, Section III (4)*. pp. 13-22.
- Albinet, M.; Margat, J. (1971). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. *Proceedings of the Moscow Symposium. Groundwater Pollution. IAHS-AISH Publ. 103, 1975. Moscow*, pp. 58-70.
- Albu, M.; Banks, D.; Nash, H. (1997). *Mineral and Thermal Groundwater Resources*. Chapman & Hall, London, 447 pp.
- Aller, L.; Bennett, T.; Lehr, J.H.; Petty, R.J.; Hackett, G. (1987). DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. EPA / 600 / 2-87 / 035, US EPA - United States Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma, 622 pp.
- Allison, G.B.; Hughes, M.W. (1978). The use of environmental chloride and tritium to estimate total local recharge to an unconfined aquifer. *Australian Journal of Soil Research*, vol 16. pp. 181-195.
- Allison, G.B.; Hughes, M.W. (1983). The use of natural tracers as indicators of soil-water movement in a temperate semi-arid region. *Journal of Hydrology*, vol 60 (1/4). pp. 157-173.
- Almeida, A.C. (1997). *Dunas de Quiaios, Gândara e Serra da Boa Viagem: Uma abordagem ecológica da paisagem*. Fundação Calouste Gulbenkian - Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica, Lisboa, 321 pp.
- Almeida, C.; Mendonça, J.J.L.; Duarte, R.S.; Quina, A.P.; Neves, J.R. (2000a). Glossário de Termos Hidrogeológicos. Centro de Geologia & Instituto da Água, 54 pp.
- Almeida, C.; Mendonça, J.J.L.; Jesus, M.R.; Gomes, A.J. (2000b). Orla Ocidental (O). *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*. Centro de Geologia & Instituto da Água, pp. 134-155.
- Almeida, C.; Mendonça, J.J.L.; Jesus, M.R.; Gomes, A.J. (2000c). Sistema Aquífero: Cársico da Bairrada (O3). *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*. Centro de Geologia & Instituto da Água, pp. 188-197.
- Almeida, C.; Mendonça, J.J.L.; Jesus, M.R.; Gomes, A.J. (2000d). Sistema Aquífero: Cretácico de Aveiro (O2). *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*. Centro de Geologia & Instituto da Água, pp. 173-187.
- Almeida, C.; Mendonça, J.J.L.; Jesus, M.R.; Gomes, A.J. (2000e). Sistema Aquífero: Quaternário de Aveiro (O1). *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*. Centro de Geologia & Instituto da Água, pp. 157-172.

- Almeida, C.; Mendonça, J.J.L.; Jesus, M.R.; Gomes, A.J. (2000f). Sistema Aquífero: Tentúgal (O5). Sistemas Aquíferos de Portugal Continental. Centro de Geologia & Instituto da Água, pp. 205-211.
- Almeida, C.; Mendonça, J.J.L.; Jesus, M.R.; Gomes, A.J. (2000g). Sistema Aquífero: Viso-Queridas (O30). Sistemas Aquíferos de Portugal Continental. Centro de Geologia & Instituto da Água, pp. 393-399.
- Almeida, C.; Mendonça, J.J.L.; Marques da Silva, M.A.; Serra, A. (1999). Síntese da Hidrogeologia das Bacias do Mondego, Vouga e Lis. IV Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (IV SILUSBA). APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Coimbra, Portugal. Disponível em CD-ROM, 17 pp.
- Almeida, F.M.; Moura, J.C. (1970). Carta das Nascentes Minerais de Portugal, 1/1000000. Serviços Geológicos de Portugal - Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos. Lisboa.
- Alves, T.M.; Gawthorpe, R.L.; Hunt, D.W.; Monteiro, J.H. (2003). Post-Jurassic tectono-sedimentary evolution of the Northern Lusitanian Basin (Western Iberian margin). *Basin Research*, vol 15 (2). pp. 227-249. [http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1111/\(ISSN\)1365-2117](http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1111/(ISSN)1365-2117)
- Andrade, A.I.A.S.S. (2004). Hidrogeoquímica e caracterização da contaminação hídrica nos corpos aluvionares do Mondego entre Coimbra e Montemor-o-Velho. Tese de Doutoramento. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 366 pp.
- Andreo, B.; Goldscheider, N.; Vadillo, I.; Vías, J.M.; Neukum, C.; Sinreich, M.; Jiménez, P.; Brechenmacher, J.; Carrasco, F.; Hötzl, H.; Perles, M.J.; Zwahlen, F. (2006). Karst groundwater protection: First application of a Pan-European Approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Líbar (Southern Spain). *Science of the Total Environment*, vol 357 (1-3). Elsevier, pp. 54-73. www.elsevier.com/locate/scitotenv
- Antonakos, A.K.; Lambrakis, N.J. (2007). Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. *Journal of Hydrology*, vol 333 (2-4). Elsevier, pp. 288-304. www.elsevier.com/locate/jhydrol
- Appelo, C.A.J.; Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*, Ed. 2. A.A. Balkema Publishers, London, 649 pp.
- Applied Electromagnetic Research - AEMR (2007a). TEM-FAST 48 - Time Domain ElectroMagnetic System (manual), version 7.3. E.B. Fainberg (Editor). the Netherlands, 82 pp.
- Applied Electromagnetic Research - AEMR (2007b). Tem-Researcher (manual), version 7. the Netherlands, 54 pp.
- Ashtech (2002). ProMark2 Survey System - User's Guide for Surveying. Santa Clara, 132 pp.
- Ashtech Solutions (2002). Ashtech - User's Guide. Santa Clara, 170 pp.
- Auge, M. (2004). Vulnerabilidad de aquíferos. *Revista Latino-Americana de Hidrogeologia*, ALHSUD - Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo, nº 4. pp. 85-103.
- Auken, E.; Christiansen, A.V.; Jacobsen, L.H.; Sørensen, K.I. (2008). A resolution study of buried valleys using laterally constrained inversion of TEM data. *Journal of Applied Geophysics*, vol 65 (1). Elsevier, pp. 10-20. www.elsevier.com/locate/jappgeo
- Azerêdo, A.C.; Duarte, L.V.; Henriques, M.H.; Manuppella, G. (2003). Da dinâmica continental no Triásico aos mares do Jurássico Inferior e Médio. *Cadernos de Geologia de Portugal*. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, 43 pp.
- Azevedo, J.M.M. (1998). *Geologia e hidrogeologia da Ilha das Flores (Açores - Portugal)*. vol 1 e 2. Tese de doutoramento. Departamento Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 403 pp.
- Barbosa, B.P. (1981a). Carta Geológica de Portugal - Notícia Explicativa da Folha 16-C, Vagos, escala 1/50000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 60 pp.
- Barbosa, B.P. (1981b). Carta Geológica de Portugal, Folha 16-C, Vagos, 1/50000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Barbosa, B.P.; Soares, A.F.; Rocha, R.B.; Manuppella, G.; Henriques, M.H. (1987-88). Carta Geológica de Portugal, Folha 19-A, Cantanhede, 1/50000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

- Barbosa, B.P.; Soares, A.F.; Rocha, R.B.; Manuppella, G.; Henriques, M.H. (1988). Carta Geológica de Portugal - Notícia Explicativa da Folha 19-A, Cantanhede, escala 1/50000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 46 pp.
- Barreira, C.; Figueiredo, F.P.O.; Dinis, P. (2008). Estudo de plumas de contaminação provocadas por cemitérios - Caso de estudo no cemitério de Fonte de Angeão, Vagos. 9º Congresso da Água. APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Cascais, Portugal. Comunicação 92, Disponível em CD-ROM, 15 pp.
- Barsukov, P.O.; Fainberg, E.B.; Khabensky, E.O. (2007). Shallow Investigations by TEM-FAST Technique: Methodology and Examples. *Methods in Geochemistry and Geophysics*, vol 40. Elsevier, pp. 55-77.
- Boletim de Minas (1917). Ano de 1915. Direcção Geral das Obras Públicas e Minas, Ministério do Fomento. Lisboa, pp. 51.
- Boletim de Minas (1938). Ano de 1936. Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos, Ministério do Comércio e Indústria. Lisboa, pp. 27.
- Boletim de Minas (1964). Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos, vol I nº 4. Lisboa, pp. 267.
- Börner, F. (2009). Complex conductivity measurements. In: Reinhard Kirsch (Editor). *Groundwater geophysics: a tool for hydrogeology*, Ed. 2. Springer, Berlin, pp. 119-153.
- Buselli, G.; Barber, C.; Davis, G.B.; Salama, R.B. (1990). Detection of groundwater contamination near waste disposal sites with transient electromagnetic and electrical methods. In: Stanley H. Ward (Editor). *Geotechnical and Environmental Geophysics. Investigations in Geophysics nº5*, vol II. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, pp. 27-39.
- Cabral, J. (1995). Neotectónica em Portugal Continental. *Memórias do Instituto Geológico e Mineiro*, nº 31, Lisboa, 265 pp.
- Cabral, J.; Ribeiro, A. (1988). Carta Neotectónica de Portugal Continental, 1/1000000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Cabral, J.; Ribeiro, A. (1989). Carta Neotectónica de Portugal - Nota explicativa, escala 1/1000000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 10 pp.
- Caetano, M.; Nunes, V.; Nunes, A. (2009). CORINE Land Cover 2006 for Continental Portugal, Relatório técnico. Instituto Geográfico Português. Lisboa.
- Calado, C.M. (1992). Atlas do Ambiente – Carta de Nascentes Minerais I.20, 1/1000000. Ministério do Ambiente e Recursos Naturais, Direcção-Geral dos Recursos Naturais. Lisboa.
- Calado, C.M. (1995). Atlas do Ambiente – Notícia Explicativa I.20 – Carta de Nascentes Minerais, 1/1000000. Ministério do Ambiente e Recursos Naturais, Direcção-Geral do Ambiente, Lisboa, 37 pp.
- Campos, V.S. (1944). Ante-projecto de captagem da nascente de águas minerais denominada “Montouro” situada na freguesia de Covões, concelho de Cantanhede, distrito de Coimbra. Relatório não publicado. Arquivo da Direcção de Serviços de Recursos Hidrogeológicos, Geotérmicos e Petróleo da Direcção Geral de Energia e Geologia. 10 pp.
- Carle, S.F.; Moran, J.E.; Esser, B.K. (2010). California GAMA Special Study: Groundwater Age Simulation and Deconvolution Methods for Interpretation of ^3H - ^3He Data. A final report for GAMA Special Studies Task 9.3. LLNL-TR-425141, Lawrence Livermore National Laboratory, 48 pp.
- Carreira, P.M.; Marques, J.M.; Carvalho, M.R.; Nunes, D.; Antunes da Silva, M. (2011a). Isotopic and geochemical signatures of Melgaço CO₂ rich cold mineral waters, NW Portugal. *Proceedings of an International Symposium. Isotopes in Hydrology, Marine Ecosystems and Climate Change Studies*. IAEA - International Atomic Energy Agency. Monaco, pp. 63-71.
- Carreira, P.M.; Marques, J.M.; Marques, J.E.; Chaminé, H.I.; Fonseca, P.E.; Santos, F.M.; Moura, R.M.; Carvalho, J.M. (2011b). Defining the dynamics of groundwater in Serra da Estrela Mountain area, central Portugal: an isotopic and hydrogeochemical approach. *Hydrogeology Journal*, vol 19 (1). Springer, pp. 117-131. <http://link.springer.com/journal/10040>
- Carreira, P.M.; Valério, P.; Nunes, D.; Araújo, M.F. (2005). Temporal and seasonal variations of stable isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) and tritium in precipitation over Portugal. In: IAEA (Editor), *Proceedings of the International Conference Isotopes in Environmental Studies, Aquatic Forum 2004*. IAEA Conference & Symposium Papers 26/P. Monaco, pp. 370-373.

- Carrington da Costa, J. (1937). O Neocretácico da Beira Litoral. Publicações do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências do Porto, vol V. Porto, 34 pp.
- Carvalho, G.J.P.; Pacheco, F.A.L. (2010). Análise da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na bacia hidrográfica do rio Sordo (Vila Real) pelo método *Fuzzy-Drastic*. Revista Recursos Hídricos, APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 31 (1). Lisboa, pp. 65-76.
- Carvalho, J.; Ramalho, E.; Dias, R.; Pinto, C.; Ressurreição, R. (2012a). A Geophysical Study of the Carcavai Fault Zone, Portugal. *Pure and Applied Geophysics*, vol 169 (1-2). Springer, pp. 183-200. <http://link.springer.com/journal/24>
- Carvalho, J.M.; Chaminé, H.I.; Teixeira, J.; Rodrigues, C.; Pereira, A.J.S.C. (2012b). Recursos hídricos subterrâneos e águas minerais naturais entre o rio Douro e o rio Lis, Portugal Central - breve síntese. In: José António Simões Cortez (Editor). *Águas Minerais Naturais e de Nascente da Região Centro*. Mare Liberum, Aveiro, pp. 107-136.
- Carvalho, P.C.S. (2004). Impacte ambiental de antigas explorações mineiras na região de Sarzedas-Castelo Branco. Tese de Mestrado. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 185 pp.
- Casas, A.; Senos Matias, M.; Rivero, L.; Marques da Silva, M.A. (1995). Estudio gravimetrico preliminar de la Ria de Aveiro. *Geociências, Revista da Universidade de Aveiro*, vol 9 (1-2). Aveiro, pp. 23-33.
- Castilho, A.M.A. (2008). Lagoas de Quiaios - Contribuição para o seu conhecimento geológico e hidrogeológico. Tese de Doutoramento. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 474 pp.
- Choffat, P. (1889). Observations sur le Pliocène du Portugal. *Bulletin de la Société Belge de Géologie de Paléontologie et d'Hydrologie*, tome III. Bruxelles, pp. 119-123.
- Choffat, P. (1897a). Parallélisme entre le Crétacique du Mondégo et celui de Lisbonne. *Le Garumnien en Portugal*. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences de Paris*, tome CXXIV. Paris, pp. 519-521.
- Choffat, P. (1897b). Sur le Crétacique de la région du Mondégo. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences de Paris*, tome CXXIV. Paris, pp. 422-424.
- Choffat, P. (1900). Recueil de monographies stratigraphiques sur le système Crétacique du Portugal. Deuxième étude: Le Crétacique supérieur au nord du Taje. Direction des Services Géologiques du Portugal, Lisbonne, 287 pp.
- Christiansen, A.V.; Auken, E.; Sørensen, K. (2009). The transient electromagnetic method. In: Reinhard Kirsch (Editor). *Groundwater geophysics: a tool for hydrogeology*, Ed. 2. Springer, Berlin, pp. 179-226.
- Civita, M. (1994a). Data needs and presentation. In: Jaroslav Vrba & Alexander Zaporozec (Editors). *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*, vol 16. IAH - International Association of Hydrogeologists (International Contributions to Hydrogeology). Verlag Heinz Heise, Hannover, pp. 57-73.
- Civita, M. (1994b). Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: Teoria & pratica. Pitagora Editrice, Bologna, 325 pp.
- Civita, M. (2010). The Combined Approach When Assessing and Mapping Groundwater Vulnerability to Contamination. *Journal of Water Resource and Protection*, vol 2 (1). Scientific Research, pp. 14-28. <http://www.scirp.org/journal/jwarp/>
- Civita, M.; De Maio, M. (2004). Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian "combined" approach. *Geofísica Internacional*, vol 43 (4). pp. 513-532.
- Clark, I.D.; Fritz, P. (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers, New York, 328 pp.
- Clesceri, L.S.; Greenberg, A.E.; Eaton, A.D. (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater, Ed. 20. American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation, Washington, pp. 1.1-4.181.
- CMMV (2011). Relatório de gestão 2010. Câmara Municipal de Montemor-o-Velho, 180 pp. Disponível em <http://www.cm-montemorvelho.pt/>

- CMMV (2012). Relatório de gestão 2011. Câmara Municipal de Montemor-o-Velho, 234 pp. Disponível em <http://www.cm-montemorvelho.pt/>
- CMMV (2013). Relatório de gestão 2012. Câmara Municipal de Montemor-o-Velho, 228 pp. Disponível em <http://www.cm-montemorvelho.pt/>
- CNA (1978). Carta III.1 - Carta dos Solos. Atlas do Ambiente Digital - Instituto do Ambiente, 1/1000000. Reprodução da Carta dos Solos do Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário, delineada por J. Carvalho Cardoso, M. Teixeira Bessa e M. Branco Marado, 1971. Comissão Nacional do Ambiente.
- Coelho, R.; Formigo, N.; Fonte, D.; Gamito, T.M.; Ribeiro, L.T. (2012). Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas do Vouga, Mondego e Lis Integradas na Região Hidrográfica 4. Caracterização Geral e Diagnóstico – Caracterização das Massas de Água Superficiais. ARH do Centro, I.P. – Administração da Região Hidrográfica do Centro, I.P., 267 pp. Disponível em <http://www.apambiente.pt/>
- Condesso de Melo, M.T. (2002). Modelo matemático de fluxo e transporte de massa do sistema multiaquífero Cretácico da região de Aveiro (Portugal). Tese de Doutoramento. Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro. Aveiro, 206 pp.
- Condesso de Melo, M.T.; Cabano, G.; Marques da Silva, M.A. (2002). Evolução hidrogeoquímica do Sistema Multiaquífero Quaternário de Aveiro. 6º Congresso da Água. APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Porto, Portugal. Comunicação 57, Disponível em CD-ROM, 17 pp.
- Condesso de Melo, M.T.; Marques da Silva, M.A. (2008). The Aveiro Quaternary and Cretaceous Aquifers, Portugal. In: W. Mike Edmunds & Paul Shand (Editors). Natural Groundwater Quality. Wiley-Blackwell, pp. 233-262.
- Condesso de Melo, M.T.; Marques da Silva, M.A.; Edmunds, W.M. (1999). Hydrochemistry and flow modelling of the Aveiro multilayer Cretaceous Aquifer. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, vol 24 (4). Elsevier, pp. 331-336. <http://www.journals.elsevier.com/physics-and-chemistry-of-the-earth/>
- Contreiras, A. (1951). Manual Hidrológico de Portugal. Empresa Nacional de Publicidade, Lisboa, 73 pp.
- Correia, C.G.; Azevedo, J.M.M.; Rodrigues, N.V.; Figueiredo, F.P.O. (2014a). Caracterização hidrogeoquímica e isotópica da nascente de Montouro (Cantanhede, Portugal). Contribuição para o modelo hidrogeológico conceptual. 12º Congresso da Água. APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Lisboa, Portugal. Comunicação 361, 11 pp.
- Correia, C.G.; Azevedo, J.M.M.; Rodrigues, N.V.; Figueiredo, F.P.O. (2014b). Morphometric characterization of a small drainage basin in Montouro (Cantanhede, Portugal) – surface and groundwater interactions. 15th Biennial Conference Euromediterranean Network of Experimental and Representative Basins - ERB2014. IMAR - Institute of Marine Research and Department of Civil Engineering of the Faculty of Sciences and Technology - University of Coimbra. Coimbra, Portugal. *Accepted for poster presentation.*
- Correia, C.G.; Cruz, R.J.L.; Figueiredo, F.P.O.; Azevedo, J.M.M.; Rodrigues, N.V. (2010a). Resultados de Prospecção Electromagnética nos Domínios Frequência e Tempo - Caso de Estudo: Montouro (Cantanhede). 10º Congresso da Água. APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Praia do Alvor, Portugal. Comunicação 116, Disponível em CD-ROM, 16 pp.
- Correia, C.G.; Cruz, R.J.L.; Machadinho, A.; Figueiredo, F.P.O.; Marques da Silva, M.A.; Senos Matias, M.J. (2010b). Prospecção electromagnética no domínio tempo aplicada a Olhos da Ferveça, Cantanhede, Portugal. GEOTIC - Sociedade Geológica de Portugal, VIII Congresso Nacional de Geologia. e-Terra, Revista Electrónica de Ciências da Terra. vol 14 - nº 7. 4 pp. <http://e-terra.geopor.pt>.
- Correia, C.G.; Marques da Silva, M.A. (1999). Hidrogeologia dos Olhos da Ferveça - Estudo preliminar. Seminário sobre águas subterrâneas. APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Lisboa, Portugal. 13 pp.
- Correia, C.G.; Rodrigues, N.V.; Jorge, R.; Figueiredo, F.P.O. (2008). Estudo de Nascente de Água Mineralizada – Montouro, Cantanhede. 9º Congresso da Água. APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Cascais, Portugal. Comunicação 95, Disponível em CD-ROM, 13 pp.

- Corriols, M.; Nielsen, M.R.; Dahlin, T.; Christensen, N.B. (2009). Aquifer investigations in the León-Chinandega plains, Nicaragua, using electromagnetic and electrical methods. *Near Surface Geophysics*, vol 7 (5-6). European Association of Geoscientists & Engineers (EAGE), pp. 413-425. <http://nsg.eage.org/>
- Costa, J.S.; Cardoso, A.T.; Silva, J.V.; Rocha, R. (2001). Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Vouga - Relatório do Plano, vol I. DRAOT Centro - Direção Regional do Ambiente e Ordenamento do Território do Centro, 410 pp.
- Croff, A.G.; Lomenick, T.F.; Lowrie, R.S.; Stow, S.H. (1985). Evaluation of five sedimentary rocks other than salt for high-level waste repository siting purposes. Oak Ridge Nat. Lab. ORNL/CF-85/2/V2. Oak Ridge, Tennessee.
- Cruz, R.J.L. (2008). Estudo da pluma de contaminação da lixeira de Vila Moreira (Alcanena) - Aplicação conjunta de métodos de prospecção geofísica e hidroquímica. Tese de Mestrado. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 161 pp.
- Cunha, P.P.; Martins, A.A. (2004). Principais aspectos geomorfológicos de Portugal Central, sua relação com o registo sedimentar e a importância do controlo tectónico. In: Maria Assunção Araújo & António Alberto Gomes (Editors), Encontro sobre Geomorfologia do Noroeste da Península Ibérica, 2002. Faculdade de Letras da Universidade do Porto, GEDES. Porto, pp. 155-182.
- Custodio, E.; Llamas, M.R. (1976). *Hidrología Subterránea*, vol II. Omega, S. A., Barcelona, pp. 1165-2359.
- Custodio, E.; Llamas, M.R. (1983). *Hidrología Subterránea*, vol I. Omega, S. A., Barcelona, 1157 pp.
- Daly, D.; Dassargues, A.; Drew, D.; Dunne, S.; Goldscheider, N.; Neale, S.; Popescu, I.C.; Zwahlen, F. (2002). Main concepts of the "European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*, vol 10 (2). Springer, pp. 340-345. <http://link.springer.com/journal/10040>
- Daly, D.; Hötzl, H.; De Ketelaere, D. (2004). Risk definition. In: François Zwahlen (Editor). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. Final report (COST Action 620) - EUR 20912. European Commission, Directorate-General for Research, Luxembourg, pp. 106-107.
- Daly, D.; Warren, W.P. (1998). Mapping groundwater vulnerability: the Irish perspective. In: N. S. Robins (Editor). *Groundwater pollution, aquifer recharge and vulnerability*. Geological Society Special Publication No 130, London, pp. 179-190.
- Davis, S.N. (1969). Porosity and permeability of natural materials. In: Roger J. M. De Wiest (Editor). *Flow through porous media*. Academic Press, New York, pp. 54-89.
- De Ketelaere, D.; Hötzl, H.; Neukum, C.; Civita, M.; Sappa, G. (2004). Hazard analysis and mapping. In: François Zwahlen (Editor). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. Final report (COST Action 620) - EUR 20912. European Commission, Directorate-General for Research, Luxembourg, pp. 86-105.
- De Maio, M.; Civita, M.; Farina, M.; Zavatti, A. (2001). *Linee-guida per la redazione e l'uso delle carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento*. ANPA - Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, 99 pp.
- Diário da República nº 68, I série (2010). Delimitação do perímetro de protecção das captações dos Olhos de Ferverença. 08 de abril de 2010. pp. 1157-1159.
- Diário da República nº 164, I série (2007). Decreto-Lei n.º 306/2007. Estabelece o regime da qualidade da água destinada ao consumo humano. 27 de agosto de 2007. pp. 5747-5765.
- Diário do Governo, nº 26, II série (1936). Declaração de abandono da concessão de Montouro. 01 de fevereiro de 1936. pp. 587.
- Diário do Governo, nº 104, II série (1923). Concessão da licença de exploração de Montouro. 07 de maio de 1923. pp. 1570.
- Diário do Governo, nº 180, II série (1936). Declaração da não existência de pretendentes à concessão de Montouro. 04 de agosto de 1936. pp. 3873.
- Diário do Governo, nº 197, III série (1943). Concessão de Montouro. 24 de agosto de 1943. pp. 1893.
- Diário do Governo nº 232, III série (1964). Declaração de abandono da concessão de Montouro. 02 de outubro de 1964. pp. 3194.

- Diário do Governo, nº 250, III série (1945). Aprovação do anteprojecto de captagem da nascente Montouro. 26 de outubro de 1945. pp. 2189.
- Diário do Governo, nº 273, II série (1915). Édito de requerimento de licença de exploração de Montouro. 24 de novembro de 1915. pp. 3582.
- Diário do Governo nº 299, III série (1964). Declaração da disponibilidade de requerer a concessão de Montouro. 23 de dezembro de 1964. pp. 3866.
- Dinis, J.M.L. (1999). Estratigrafia e sedimentologia da Formação de Figueira da Foz: Aptiano a Cenomaniano do sector norte da Bacia Lusitânica. Tese de Doutoramento. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 381 pp.
- Dinis, J.M.L. (2001a). Definição da Formação da Figueira da Foz - Aptiano a Cenomaniano do sector central da margem oeste ibérica. *Comun. Inst. Geol. e Mineiro*, vol 88. Lisboa, pp. 127-160.
- Dinis, P. (2001b). Um horst litoral entre os rios Vouga e Mondego. 7ª Conferência Anual do Grupo de Geologia Estrutural e Tectónica. *Alfragide*, pp. 66-68.
- Dinis, P. (2004). Evolução Pliocénica e Quaternária do Vale do Cértima. Tese de Doutoramento. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 351 pp.
- DKK-TOA Corporation (2004). Hand-held Water Quality Meter WQC-24. Instruction Manual. Tokyo, 137 pp.
- Doerfliger, N.; Jeannin, P.-Y.; Zwahlen, F. (1999). Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology*, vol 39 (2). Springer-Verlag, pp. 165-176. <http://link.springer.com/journal/254>
- Doerfliger, N.; Zwahlen, F. (1998). Practical guide: groundwater vulnerability mapping in karstic regions (EPIK). Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern, 56 pp.
- Domenico, P.A.; Schwartz, F.W. (1997). Physical and chemical hydrogeology, Ed. 2. John Wiley & Sons, New York, 506 pp.
- Duarte, L.V.; Soares, A.F. (2002). Litostratigrafia das séries margo-calcárias do Jurássico inferior da Bacia Lusitânica (Portugal). *Comun. Inst. Geol. e Mineiro*, vol 89. pp. 135-154.
- Dunne, S. (2004). Existing Vulnerability Mapping Methods. In: François Zwahlen (Editor). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report (COST Action 620) - EUR 20912*. European Commission, Directorate-General for Research, Luxembourg, pp. 293-297.
- Eberts, S.M.; Böhlke, J.K.; Kauffman, L.J.; Jurgens, B.C. (2012). Comparison of particle-tracking and lumped-parameter age-distribution models for evaluating vulnerability of production wells to contamination. *Hydrogeology Journal*, vol 20 (2). Springer, pp. 263-282. <http://link.springer.com/journal/10040>
- Eijkelkamp (2003). Multi-parameter analyser 18.28. Manual. Giesbeek, Netherlands, 45 pp.
- Eriksson, E. (1965). An account of the major pulses of tritium and their effects in the atmosphere. *Tellus*, vol 17 (1). Stockholm, pp. 118-130.
- ESRI Inc. (2010). ArcGIS 10.0. California, USA.
- Essenwanger, O.M. (2001). *General Climatology 1C: Classification of Climates*, vol 1. Elsevier Science Limited, 113 pp.
- Evans, B.M.; Myers, W.L. (1990). A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC. *Journal of Soil and Water Conservation*, vol 45 (2). Soil and Water Conservation Society, pp. 242-245. <http://www.jswconline.org/>
- Everett, M.E. (2013). *Near-Surface Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 403 pp.
- Ezersky, M.; Legchenko, A.; Al-Zoubi, A.; Levi, E.; Akkawi, E.; Chalikakis, K. (2011). TEM study of the geoelectrical structure and groundwater salinity of the Nahal Hever sinkhole site, Dead Sea shore, Israel. *Journal of Applied Geophysics*, vol 75 (1). Elsevier, pp. 99-112. www.elsevier.com/locate/jappgeo
- Falkland, A.; Custodio, E. (1991). Hydrology and water resources of small islands: a practical guide. In: A. Falkland (Editor). UNESCO, 435 pp.

- FAO (1988). Soil Map of the World - Revised legend with corrections and updates. Reprint of World Soil Resources Report 60, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. Technical Paper 20, ISRIC - International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, 1997, 140 pp.
- Farid, I.; Zouari, K.; Kallali, A.R. (2012). Hydrogeochemical Data from a Multilayer Aquifer System in Central Tunisia. *Libyan Agriculture Research Center Journal International*, vol 3 (5). IDOSI Publications (IDOSI - International Digital Organization for Scientific Information), pp. 218-223. <http://www.idosi.org/larcji/online.htm>
- Feijó, J.; Francisco, M.D.; Ribeiro, L.T. (2012). Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas do Vouga, Mondego e Lis Integradas na Região Hidrográfica 4. Caracterização Geral e Diagnóstico – Caracterização do Uso do Solo e Ordenamento do Território. ARH do Centro, I.P. – Administração da Região Hidrográfica do Centro, I.P., 119 pp. Disponível em <http://www.apambiente.pt/>
- Feitosa, F.A.C.; Filho, J.M. (2000). Hidrogeologia - conceitos e aplicações, Ed. 2. Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Fortaleza, 391 pp.
- Ferreira, F.A. (1992). Métodos electromagnéticos de prospecção aplicados em geologia de engenharia. Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 180 pp.
- Ferreira, P. (1995). Hidrogeologia do Quaternário da região norte da Ria de Aveiro. Tese de Mestrado. Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro. Aveiro, 102 pp.
- Ferronsky, V.I.; Polyakov, V.A. (2012). *Isotopes of the Earth's Hydrosphere*. Springer, 628 pp.
- Figueiredo, F.P.O. (1990). Método de resistividade eléctrica aplicado ao estudo de aquíferos costeiros: Caracterização do aquífero superficial da península Barra-Costa Nova do Prado-Vagueira (Aveiro). Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica. Secção Autónoma de Engenharia de Minas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 168 pp.
- Figueiredo, F.P.O. (2001). Gravimetria aplicada à organização geométrica da cobertura meso-cenozóica (Baixo Vouga). Tese de Doutoramento. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 223 pp.
- Figueiredo, F.P.O. (2006). Estudo de uma Pluma de Contaminação pelo Método de Prospecção Electromagnético no Domínio Frequência – Geria, Coimbra. 8º Congresso da Água. APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Figueira da Foz, Portugal. Comunicação 171, Disponível em CD-ROM, 14 pp.
- Filippini, M.; Gargini, A.; Gkemitzi, A.; Kværner, J.; Meeks, J.; Stumpp, C.; Rózański, K.; Wachniew, P.; Witczak, S.; Żurek, A. (2013). Critical review of methods for assessment of vulnerability of groundwater systems. GENESIS - Groundwater and Dependent Ecosystems: New Scientific and Technological Basis for Assessing Climate Change and Land-use Impacts on Groundwater. Seventh Framework Programme of the European Community, 74 pp. Disponível em www.thegenesisproject.eu
- Fitterman, D.V.; Stewart, M.T. (1986). Transient electromagnetic sounding for groundwater. *Geophysics*, vol 51 (4). pp. 995-1005.
- Foster, S. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: W. van Duijvenbooden & H.G. van Waegeningh (Editors), *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants*, Proceedings and Information No. 38 of the International Conference held in the Netherlands. TNO Committee on Hydrological Research. Delft, The Netherlands, pp. 69-86.
- Foster, S. (2007). Aquifer pollution vulnerability concept and tools - use, benefits and constraints. In: Andrzej J. Witkowski, Andrzej Kowalczyk & Jaroslav Vrba (Editors). *Groundwater Vulnerability Assessment and Mapping*. IAH - Selected Papers, vol 11. Taylor & Francis, pp. 1-9.
- Foster, S.; Hirata, R. (1988). Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO/ HPE-CEPIS Publication, Lima, Peru, 79 pp.

- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'Elia, M.; Paris, M. (2006). Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Mundial, Washington, D.C., 104 pp.
- Fraga, C.M.; Fernandes, L.F.S.; Pacheco, F.A.L.; Reis, C.; Moura, J.P. (2013). Exploratory assessment of groundwater vulnerability to pollution in the Sordo River Basin, Northeast of Portugal. REM - Revista Escola de Minas, vol 66 (1). pp. 49-58. <http://www.rem.com.br/>
- Francés, A.; Paralta, E.; Fernandes, J.; Ribeiro, L. (2001). Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agricultural pollution: the Susceptibility Index. In: Luís Ribeiro (Editor), Proceedings 3rd International Conference on Future Groundwater Resources at Risk. CVRM - Centro de Geo-Sistemas. Lisboa, Portugal, pp. 35-44.
- Freeze, R.A.; Cherry, J.A. (1979). Groundwater. Prentice-Hall, New Jersey, 604 pp.
- Galego Fernandes, P.; Carreira, P.M.; Nunes, D. (2007). Hidrologia isotópica no Instituto Tecnológico e Nuclear (ITN) - Casos de estudo. Seminário sobre Águas Subterrâneas. APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Lisboa, Portugal, 15 pp.
- Garmin Ltd. (2009). Garmin Dakota 10 and 20 - owner's manual. Kansas City, USA, 42 pp.
- Garrels, R.M.; Christ, C.L. (1965). Solutions, minerals, and equilibria. Harper & Row e John Weatherhill, Inc., New York e Tokyo, 450 pp.
- Gat, J.R.; Karfunkel, U.; Nir, A. (1962). Tritium content of rainwater from the Eastern Mediterranean area. Use of Tritium in the Physical and Biological Sciences, vol 1. IAEA - International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 41-54.
- Gat, J.R.; Mook, W.G.; Meijer, H.A.J. (2001). Atmospheric water. In: Willem G. Mook (Editor). Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications, vol 2. International Atomic Energy Agency & United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Water Resources Programme, Paris, pp. 167-235.
- Geo Studio Tecnologia (2008). GPS TrackMaker - Reference Guide. Belo Horizonte, Brasil, 177 pp.
- GEONICS (1984). Operating Manual for EM 31 non contacting terrain conductivity meter. Geonics Limited. Ontário, Canada, 49 pp.
- GEONICS (1990). EM 34-3 e EM 34-3XL Operating Instructions. Geonics Limited. Ontário, Canada, 22 pp.
- Geotechnical Instruments (2005). Standard Dipmeter - Operating Manual for models DM2.1-30 / DM2.1-60 / DM2.1-100 / DM2.1-200 / DM2.1-300 / DM2.1-400 / DM2.1-500. Warwickshire, 5 pp.
- Golden Software Inc. (2009). Surfer 9 User's Guide. Contouring and 3D surface mapping for scientists and engineers. Colorado, USA, 50 pp.
- Goldman, M.; Arad, A.; Kafri, U.; Gilad, D.; Melloul, A. (1988). Detection of freshwater / seawater interface by the Time Domain Electromagnetic Method (TDEM) in Israel. Proceedings 10th Salt Water Intrusion Meeting (SWIM). Natuurwetenschappelijk Tijdschrift, Ghent, pp. 329-344.
- Goldman, M.; Gilad, D.; Ronen, A.; Melloul, A. (1991). Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the time domain electromagnetic method. Geoexploration, vol 28. Elsevier Science Publishers B. V., Amesterdão, pp. 153-174.
- Goldscheider, N.; Popescu, I.C. (2004). The European Approach. In: François Zwahlen (Editor). Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report (COST Action 620) - EUR 20912. European Commission, Directorate-General for Research, Luxembourg, pp. 17-21.
- Gonçalves, J.A.; Madeira, S.; Sousa, J.J. (2008). GPS - Sistema de Posicionamento Global. Topografia: conceitos e aplicações. Lidel, Lisboa, pp. 261-307.
- Gonçalves, R.M.D. (2012). Hydrochemical Water Prediction (Water Quality) with Transient Electromagnetic Soundings (TEM). Tese de Doutoramento. Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Lisboa, 314 pp.
- Google Earth (2010). [Consult. em jan. 2010]. Disponível em <http://www.google.com/earth/index.html>
- Google Earth (2012). [Consult. em abr. 2012]. Disponível em <http://www.google.com/earth/index.html>
- Google Earth (2013). [Consult. em jul. 2013]. Disponível em <http://www.google.com/earth/index.html>

- Grant, F.S.; West, G.F. (1965). Interpretation Theory in Applied Geophysics. McGraw-Hill, New York, 584 pp.
- Grindley, J. (1967). The estimation of soil moisture deficits. Meteorological Magazine, vol 96. pp. 97-108.
- Guru, B.S.; Hizioglu, H.R. (2004). Electromagnetic Field - Theory Fundamentals, Ed. 2. Cambridge University Press, 681 pp.
- Hach (2006). Digital Titrator. User Manual. Ed. 24. Catalog Number 16900-08. Loveland, pp. 41-48.
- Haertlé, T. (1983). Method of working and employment of EDP during preparation of groundwater vulnerability maps. Proceedings of the Koblenz Symposium. Groundwater in Water Resources Planning. IAHS-AISH Publ. 142. Koblenz, pp. 1073-1085.
- HANNA Instruments (1999). Turbidímetro Portátil com Micropocessador HI 93703. Manual de Instruções. Ronchi di Villafranca, 23 pp.
- Hashimoto, T.; Stedinger, J.R.; Loucks, D.P. (1982). Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation. Water Resources Research, vol 18 (1). Wiley, pp. 14-20.
- Healy, R.W. (2010). Estimating Groundwater Recharge. Cambridge University Press, 245 pp.
- Heen, Z.H.A. (2002). Geophysical Study of Ferveça Region (Cantanhede - Centre de Portugal). Tese de Doutoramento. Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro. Aveiro, 592 pp.
- Hem, J.D. (1985). Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water, Ed. 3. U.S. Geological Survey Water - Supply Paper 2254, 264 pp.
- Henriques, F.F. (1998). Aquilégio Medicinal, Edição fac-similada de 1726. Instituto Geológico e Mineiro. Ministério da Economia, Lisboa, pp. 115-116.
- Herraiz, M.; De Vicente, G.; Lindo-Ñaupari, R.; Giner, J.; Simón, J.L.; González-Casado, J.M.; Vadillo, O.; Rodríguez-Pascua, M.A.; Cicuéndez, J.I.; Casas, A.; Cabañas, L.; Rincón, P.; Cortés, A.L.; Ramírez, M.; Lucini, M. (2000). The recent (upper Miocene to Quaternary) and present tectonic stress distributions in the Iberian Peninsula. Tectonics, vol 19, nº 4. pp. 762-786.
- Hiscock, K. (2005). Hydrogeology: principles and practice. Blackwell Publishing, Malden, 389 pp.
- Hoffman, C.M.; Stewart, G.L. (1966). Quantitative Determination of Tritium in Natural Waters. Geological Survey Water - Supply Paper 1696-D. U. S. Department of the Interior, Washington, 18 pp.
- Hötzl, H.; Delparte, C.; Liesch, T.; Malik, P.; Neukum, C.; Svasta, J. (2004). Risk Mapping. In: François Zwahlen (Editor). Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report (COST Action 620) - EUR 20912. European Commission, Directorate-General for Research, Luxembourg, pp. 113-120.
- Huan, H.; Wang, J.; Teng, Y. (2012). Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate based on a modified DRASTIC model: A case study in Jilin City of northeast China. Science of the Total Environment, vol 440 Elsevier, pp. 14-23. www.elsevier.com/locate/scitotenv
- Huneau, F.; Jaunat, J.; Kavouri, K.; Plagnes, V.; Rey, F.; Dörfliger, N. (2013). Intrinsic vulnerability mapping for small mountainous karst aquifers, implementation of the new PaPRIKa method to Western Pyrenees (France). Engineering Geology, vol 161. Elsevier, pp. 81-93. www.elsevier.com/locate/enggeo
- IAEA (1976). Procedure and technique critique for tritium enrichment by electrolysis at IAEA laboratory. Isotope Hydrology Laboratory, Technical procedure nº 19. IAEA - International Atomic Energy Agency. Vienna.
- IAEA (1983). Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology. Technical Reports Series nº 91, IAEA - International Atomic Energy Agency, Vienna, 440 pp.
- IAEA/WMO (2013). Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. [Consult. em nov. 2013]. Disponível em <http://www.iaea.org/water>
- IBM (2013). IBM SPSS Statistics Base 22. International Business Machines Corp., USA.
- IGeoE (2001a). Carta Militar de Portugal nº 207 de Vilarinho do Bairro (Anadia), série M888, 1/25000. Instituto Geográfico do Exército. Lisboa.
- IGeoE (2001b). Carta Militar de Portugal nº 217 de Tocha (Cantanhede), série M888, 1/25000. Instituto Geográfico do Exército. Lisboa.

- IGeoE (2001c). Carta Militar de Portugal nº 218 Cantanhede, série M888, 1/25000. Instituto Geográfico do Exército. Lisboa.
- IGeoE (2001d). Carta Militar de Portugal nº 228 Quiaios (Figueira da Foz), série 888, 1/25000. Instituto Geográfico do Exército. Lisboa.
- IGeoE (2001e). Carta Militar de Portugal nº 229 Ançã (Cantanhede), série 888, 1/25000. Instituto Geográfico do Exército. Lisboa.
- IGeoE (2012). Sistema de Estações de Referência GPS VIRTuais (SERVIR). Instituto Geográfico do Exército. [Consult. em 07 mar. 2012 e 21 mar. 2012]. Disponível em <http://www.igeoe.pt/servir/servir.asp>
- IGP (2009). Mapa CORINE Land Cover - CLC06. Cartografia digital, Instituto Geográfico Português. Lisboa.
- IGP (2010a). Carta de Ocupação do Solo - COS' 2007. Cartografia digital, Instituto Geográfico Português. Lisboa.
- IGP (2010b). Carta de Uso e Ocupação do Solo de Portugal Continental para 2007 (COS2007). Memória descritiva. Instituto Geográfico Português, Lisboa, 79 pp.
- IGP (2012). Perguntas mais frequentes relacionadas com o IGP. [Consult. em jun. 2012]. Disponível em <http://www.igeo.pt/perguntas.htm>
- IGP (2012, 2013). RENEPE - Rede Nacional de Estações Permanentes. Instituto Geográfico Português. [Consult. em 16 mar. 2012, 13 abr. 2012, 31 mai. 2012, 08 jun. 2012, 18 jul. 2012 e 01 jul. 2013]. Disponível em <http://www.igeo.pt/produtos/geodesia/vg/renepe/renepe.asp>
- IGP (2013). Carta Administrativa Oficial de Portugal. Instituto Geográfico Português. [Consult. em 09 jan. 2013]. Disponível em <http://www.igeo.pt/produtos/cadastrro/caop/inicial.htm>
- IM (2010a). Boletim climatológico mensal – dezembro 2010. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 12 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2010b). Boletim climatológico mensal – novembro 2010. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 11 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2010c). Boletim climatológico mensal – outubro 2010. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 9 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2011a). Boletim climatológico mensal – abril 2011. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 13 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2011b). Boletim climatológico mensal – agosto 2011. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 12 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2011c). Boletim climatológico mensal – dezembro 2011. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 9 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2011d). Boletim climatológico mensal – fevereiro 2011. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 10 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2011e). Boletim climatológico mensal – janeiro 2011. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 10 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2011f). Boletim climatológico mensal – julho 2011. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 16 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2011g). Boletim climatológico mensal – junho 2011. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 10 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2011h). Boletim climatológico mensal – maio 2011. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 14 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2011i). Boletim climatológico mensal – março 2011. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 8 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2011j). Boletim climatológico mensal – novembro 2011. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 9 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2011k). Boletim climatológico mensal – outubro 2011. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 15 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2011l). Boletim climatológico mensal – setembro 2011. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 9 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2012a). Boletim Climatológico Anual - Ano 2011. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e da Ciência, Lisboa, 2 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>

- IM (2012b). Boletim climatológico mensal – abril 2012. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 10 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2012c). Boletim climatológico mensal – agosto 2012. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 12 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2012d). Boletim climatológico mensal – fevereiro 2012. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 18 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2012e). Boletim climatológico mensal – janeiro 2012. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 11 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2012f). Boletim climatológico mensal – julho 2012. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 14 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2012g). Boletim climatológico mensal – junho 2012. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 13 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2012h). Boletim climatológico mensal – maio 2012. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 12 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2012i). Boletim climatológico mensal – março 2012. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 14 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM (2012j). Boletim climatológico mensal – setembro 2012. Instituto de Meteorologia, I.P., Ministério da Educação e Ciência, Lisboa, 13 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IM; AEMet (2011). Atlas Climático Ibérico - Temperatura do ar e precipitação (1971-2000). Instituto de Meteorologia, I.P. & Agência Estatal de Meteorologia de Espanha, 80 pp. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- Inova-EEM (2009). Relatório e contas 2008, 57 pp. Disponível em <http://www.inova-em.pt/>
- Inova-EEM (2010). Relatório e contas 2009, 64 pp. Disponível em <http://www.inova-em.pt/>
- Inova-EEM (2011). Relatório e contas 2010, 77 pp. Disponível em <http://www.inova-em.pt/>
- Inova-EEM (2012a). [Consult. em 10 abr. 2012]. Disponível em <http://www.inova-em.pt/>
- Inova-EEM (2012b). Relatório e contas 2011, 79 pp. Disponível em <http://www.inova-em.pt/>
- Inova-EEM (2013a). [Consult. em 15 jan. 2013]. Disponível em <http://www.inova-em.pt/>
- Inova-EEM (2013b). Relatório e contas 2012, 96 pp. Disponível em <http://www.inova-em.pt/>
- Inova-EEM (2014a). [Consult. em 02 abr. 2014]. Disponível em <http://www.inova-em.pt/>
- Inova-EEM (2014b). Relatório e contas 2013, 87 pp. Disponível em <http://www.inova-em.pt/>
- IPMA (2013). Normais climatológicas. Instituto Português do Mar e da Atmosfera. [Consult. em jan. 2014]. Disponível em <http://www.ipma.pt>
- IUSS Working Group WRB (2006). World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication. World Soil Resources Reports No. 103, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 128 pp.
- Javadi, S.; Kavehkar, N.; Mohammadi, K.; Khodadadi, A.; Kahawita, R. (2011a). Calibrating DRASTIC using field measurements, sensitivity analysis and statistical methods to assess groundwater vulnerability. *Water International*, vol 36 (6). Taylor & Francis Group, pp. 719-732. <http://www.tandfonline.com/toc/rwin20/current>
- Javadi, S.; Kavehkar, N.; Mohammadi, K.; Khodadadi, A.; Kahawita, R. (2011b). Modification of DRASTIC model to map groundwater vulnerability to pollution using nitrate measurements in agricultural areas. *Journal of Agricultural Science and Technology*, vol 13 (2). Tarbiat Modares University, pp. 239-249. <http://jast.modares.ac.ir/>
- Johnson, A.I.; Morris, D.A. (1962). Physical and hydrologic properties of water bearing deposits from core holes in the Los Banos-Kettleman City area, California. Open file report, U. S. Geol. Survey, Denver, Colorado, 182 pp.
- Kafri, U.; Goldman, M.; Lang, B. (1997). Detection of subsurface brines, freshwater bodies and the interface configuration in-between by the time domain electromagnetic method in the Dead Sea Rift, Israel. *Environmental Geology*, vol 31 (1/2). Springer-Verlag, pp. 42-49. <http://link.springer.com/journal/254>
- Katz, B.G.; Coplen, T.B.; Bullen, T.D.; Davis, J.H. (1997). Use of chemical and isotopic tracers to characterize the interactions between groundwater and surface water in mantled karst. *Groundwater*, vol 35 (6). Wiley, pp. 1014-1028.

- Kaufman, S.; Libby, W.F. (1954). The natural distribution of tritium. *Physical Review*, vol 93 (6). pp. 1337-1344.
- Kearey, P.; Brooks, M.; Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*, Ed. 3. Blackwell Science Ltd, 262 pp.
- Kim, Y.J.; Hamm, S.-Y. (1999). Assessment of the potential for groundwater contamination using the DRASTIC/EGIS technique, Cheongju area, South Korea. *Hydrogeology Journal*, vol 7 (2). Springer, pp. 227-235. <http://link.springer.com/journal/10040>
- Kruseman, G.P.; de Ridder, N.A. (1990). *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*, International Institute for Land Reclamation and Improvement. Publication nº 47. 2nd Ed., Wageningen, The Netherlands, 377 pp.
- Kullberg, J.C.; Rocha, R.B.; Soares, A.F.; Rey, J.; Terrinha, P.; Azerêdo, A.C.; Callapez, P.; Duarte, L.V.; Kullberg, M.C.; Martins, L.; Miranda, R.; Alves, C.; Mata, J.; Madeira, J.; Mateus, O.; Moreira, M.; Nogueira, C.R. (2013). A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. In: Rui Dias, Alexandre Araújo, Pedro Terrinha & José Carlos Kullberg (Editors). *Geologia de Portugal - Geologia Meso-cenozóica de Portugal*, vol II. Escolar Editora, Lisboa, pp. 195-347.
- Kullberg, J.C.; Rocha, R.B.; Soares, A.F.; Rey, J.; Terrinha, P.; Callapez, P.; Martins, L. (2006). A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. In: Rui Dias, Alexandre Araújo, Pedro Terrinha & J.C. Kullberg (Editors). *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria*. Univ. Évora, Évora, pp. 317-368.
- LaMotte Company (1998). *Ammonia Nitrogen in Water Test Kit - Model Pan, Code 4795*. LaMotte Octet Comparator Test Kits, Bi-color Readers and Dalite Reader Lamps. Chestertown, Maryland, USA, 1 pp.
- Lauverjat, J.; Martins de Carvalho, J.; Marques da Silva, M.A. (1983). Contribuição para o estudo hidrogeológico da região de Aveiro. *Boletim da Sociedade Geológica de Portugal*, vol 24. pp. 295-304.
- Lee, S. (2003). Evaluation of waste disposal site using the DRASTIC system in Southern Korea. *Environmental Geology*, vol 44 (6). Springer-Verlag, pp. 654-664. <http://link.springer.com/journal/254>
- Lepierre, C. (1906). *Análise química duma Água Mineral medicinal de Relobada, freguesia de Covões, Concelho de Cantanhede*. Arquivo da Direcção de Serviços de Recursos Hidrogeológicos, Geotérmicos e Petróleo da Direcção Geral de Energia e Geologia.
- Lepvrier, C.; Mougenot, D. (1984). Déformations cassantes et champs de contrainte post-hercyniens dans l'Ouest de l'Ibérie (Portugal). *Revue de géologie dynamique et de Géographie physique*, vol 25, fasc 4. Paris, pp. 291-305.
- Libby, W.F. (1962). Tritium geophysics: Recent data and results. *Use of Tritium in the Physical and Biological Sciences*, vol 1. IAEA - International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 5-32.
- LNEC (2002). *Cartografia da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas do concelho de Montemor-o-Novo utilizando o método DRASTIC*. Proc. 607/1/14252, LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica, Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas, Lisboa, 53 pp.
- Lobo-Ferreira, J.P. (1998). *Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e protecção dos aquíferos de Portugal*. 4º Congresso da Água. APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Lisboa, Portugal. Comunicação 23, Disponível em CD-ROM, 16 pp.
- Lobo-Ferreira, J.P.; Cabral, M. (1991). Proposal for an operational definition of vulnerability for the European Community's Atlas of Groundwater Resources. In: Meeting of the European Institute for Water, Groundwater Work Group Brussels, feb. 1991.
- Lobo-Ferreira, J.P.; Oliveira, M.M. (1993). *Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal. Caracterização dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Mapeamento DRASTIC da Vulnerabilidade dos Aquíferos de Portugal*. Relatório 179/93 - GIAS. Lisboa.
- Lobo-Ferreira, J.P.; Oliveira, M.M.; Ciabatti, P. (1995a). *Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal*, vol 1. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica, Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas, Lisboa, 525 pp.

- Lobo-Ferreira, J.P.; Oliveira, M.M.; Moinante, M.J. (1995b). Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal, vol 2. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica, Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas, Lisboa, 514 pp.
- Lopes, J.G. (1907). Águas Minero-Medicinais de Montouro: Descrição do valor e importância medicinal das águas e de todas as condições que as cercam. Relatório integrado no Processo de pedido de concessão submetido por Joaquim Pereira Machado em 20 de novembro de 1915 à Repartição de Minas. Arquivo da Direcção de Serviços de Recursos Hidrogeológicos, Geotérmicos e Petróleo da Direcção Geral de Energia e Geologia. 26 pp.
- Lowrie, W. (2007). Fundamentals of Geophysics, Ed. 2. Cambridge University Press, New York, 381 pp.
- Lucas, L.L.; Unterweger, M.P. (2000). Comprehensive Review and Critical Evaluation of the Half-Life of Tritium. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, vol 105 (4). National Institute of Standards and Technology, pp. 541-549. <http://www.archive.org/details/jresv105n4p541>
- Luzes, O.; Lepierre, C.; Narciso, A.; d'Arrochella; Leile, A.P. (1934-1935). Les eaux et les stations thermales du Centre du Portugal in Le Portugal Hydrologique et Climatique, vol III. Édition officielle de la Direction Générale des Mines et Services Géologiques et de l'Institut d'Hydrologie et de Climatologie de Lisbonne. Soc. Astória, Ltd, Lisbonne, pp. 616.
- Machadinho, A. (2008). Aplicação de métodos gravimétricos na caracterização tectono-estrutural do bordo norte da Serra da Boa Viagem. Tese de Mestrado. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 73 pp.
- Machadinho, A. (2014). Modelação da geometria de rochas granitóides recorrendo a métodos geofísicos gravimétricos e magnéticos: Uma contribuição para a avaliação do potencial geotérmico na região centro de Portugal. Tese de Doutoramento. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 320 pp.
- Machadinho, A.; Pereira, L.; Figueiredo, F. (2010). Structural analysis of the Serra da Boa Viagem stratigraphic series (Central Portugal): preliminary study. Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo. Oviedo, pp. 18-22.
- Magellan Corporation (2002). Magellan - User Manual SporTrak Series of GPS. San Dimas, USA, 76 pp.
- Majandang, J.; Sarapirome, S. (2013). Groundwater vulnerability assessment and sensitivity analysis in Nong Rua, Khon Kaen, Thailand, using a GIS-based SINTACS model. Environmental Earth Sciences, vol 68 (7). Springer, pp. 2025-2039. <http://link.springer.com/journal/12665>
- Margat, J. (1968). Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution: Bases de sa cartographie. Document 68 SGL 198 HYD, BRGM - Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France, 10 pp.
- Marques da Silva, M.A. (1990). Hidrogeologia del Sistema Multiacuifero Cretacico del Bajo Vouga - Aveiro (Portugal). Tese de Doutoramento. Facultad de Geologia, Universidad de Barcelona. Barcelona, 436 pp.
- Marques da Silva, M.A. (1992). Camadas-guia do Cretácico de Aveiro e sua importância hidrogeológica. Geociências, Revista da Universidade de Aveiro, vol 7 (1-2). Aveiro, pp. 111-124.
- Marques da Silva, M.A. (2000). Olhos da Fervença - Estudo Hidrogeológico. Relatório (não publicado). Departamento de Geociências - Universidade de Aveiro, Aveiro, 106 pp.
- Marques da Silva, M.A. (2009). Perímetros de protecção das captações de água subterrânea dos Olhos da Fervença - Relatório final (não publicado). IMA 92.09-09/01.05, IDAD - Instituto do Ambiente e Desenvolvimento, Aveiro, 31 pp.
- Marques, J.M.; Graça, H.; Eggenkamp, H.G.M.; Carreira, P.M.; Mayer, B.; Nunes, D. (2012). Contribuição de traçadores geoquímicos e isotópicos para a avaliação das águas termais das Caldas da Rainha. Comunicações Geológicas, vol 99 (2). LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia, pp. 43-51. <http://www.lneg.pt/iedt/unidades/16/paginas/26/30/125>
- Massoud, U.; Santos, F.; El Qady, G.; Atya, M.; Soliman, M. (2010). Identification of the shallow subsurface succession and investigation of the seawater invasion to the Quaternary aquifer at the northern part of El Qaa plain, Southern Sinai, Egypt by transient electromagnetic data. Geophysical Prospecting, vol 58 (2). European Association of Geoscientists & Engineers (EAGE), pp. 267-277. [http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1111/\(ISSN\)1365-2478](http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1111/(ISSN)1365-2478)

- Mata, M.M. (1963). Anuário Médico-hidrológico de Portugal. Direcção Geral de Saúde. Ministério da Saúde e Assistência, Lisboa, pp. 34, 45, 232 e 703.
- Matias, J.M.G. (2010). Subsistema Aquífero da Mata do Urso: Vulnerabilidade Natural e Risco de Contaminação. Tese de Mestrado. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 122 pp.
- Matthess, G. (1982). The properties of groundwater. John Wiley & Sons, 406 pp.
- Matthess, G. (1987). Summary, conclusions and recommendations. In: W. van Duijvenbooden & H.G. van Waegeningh (Editors), Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants, Proceedings and Information No. 38 of the International Conference held in the Netherlands. TNO Committee on Hydrological Research. Delft, The Netherlands, pp. 29-38.
- Mayo, A.L.; Loucks, M.D. (1995). Solute and isotopic geochemistry and groundwater flow in the central Wasatch Range, Utah. *Journal of Hydrology*, vol 172. Elsevier Science Publishers B. V., Amesterdão, pp. 31-59.
- McNeill, J.D. (1980a). Electrical conductivity of soils and rocks. Technical Note TN-5. Geonics Limited. Ontário, Canada, 22 pp.
- McNeill, J.D. (1980b). Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Technical Note TN-6. Geonics Limited. Ontário, Canada, 15 pp.
- McNeill, J.D. (1990). Use of electromagnetic methods for groundwater studies. In: Stanley H. Ward (Editor). *Geotechnical and Environmental Geophysics. Investigations in Geophysics nº 5*, vol I. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, pp. 191-218.
- McNeill, J.D. (1994). Principles and Application of Time Domain Electromagnetic Techniques for Resistivity Sounding. Technical Note TN-27. Geonics Limited. Ontário, Canada, 16 pp.
- Mendonça, A.M. (1921). Relatório de reconhecimento da nascente d'água minero-medicinal de Montouro. Arquivo da Direcção de Serviços de Recursos Hidrogeológicos, Geotérmicos e Petróleo da Direcção Geral de Energia e Geologia. 2 pp.
- Mendonça, J.L. (1998). Caracterização hidrogeológica e contaminações de alguns sistemas aquíferos de Portugal. 4º Congresso da Água. APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Lisboa, Portugal. Comunicação 51, Disponível em CD-ROM, 11 pp.
- Mendonça, J.L.; Silva, M.O.; Bahir, M. (2004). Considerations concerning the origin of the Estoril (Portugal) thermal water. *Estudios Geológicos*, vol 60 (3-6). pp. 153-159.
- Mendoza, J.A.; Barmen, G. (2006). Assessment of groundwater vulnerability in the Río Artiguas basin, Nicaragua. *Environmental Geology*, vol 50 (4). Springer-Verlag, pp. 569-580. <http://link.springer.com/journal/254>
- Meybeck, M. (1987). Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American Journal of Science*, vol 287 (5). Connecticut, pp. 401-428.
- Michel, R.L. (2007). Tritium in the Hydrologic Cycle. In: Pradeep K. Aggarwal, Joel R. Gat & Klaus F.O. Froehlich (Editors). IAEA - International Atomic Energy Agency, *Isotopes in the Water Cycle: Past, Present and Future of a Developing Science*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 53-66.
- Microsoft Corporation (2007). Microsoft Office Excel 2007. Washington, USA.
- Milson, J. (2003). *Field Geophysics*, Ed. 3. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England, 232 pp.
- Milton Roy Company (1992). Spectronic 1201 & 1001 Plus Spectrophotometers - Operator's Manual. Rochester, New York, USA, 261 pp.
- Mook, W.G. (2000). Introduction - Theory, methods, review. In: Willem G. Mook (Editor). *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications*, vol 1. International Atomic Energy Agency & United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Water Resources Programme, Paris, 280 pp.
- Morais, M.J.F. (2012). Sistemas hidrominerais nos terrenos graníticos da zona centro-ibérica em Portugal central: perspectivas químicas, isotópicas e genéticas sobre as águas sulfúreas. Tese de Doutoramento. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 290 pp.
- Mougenot, D. (1989). Géologie de la Marge Portugaise. Tese de Doutoramento. Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, Instituto Hidrográfico. Lisboa, 259 pp.

- Nabighian, M.N.; Macnae, J.C. (1991). Time domain electromagnetic prospecting methods. In: Misac N. Nabighian (Editor). *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Investigations in Geophysics nº3, vol 2 - Applications, Part A.* Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, pp. 427-520.
- Neshat, A.; Pradhan, B.; Dadras, M. (2014a). Groundwater vulnerability assessment using an improved DRASTIC method in GIS. *Resources Conservation and Recycling*, vol 86. Elsevier, pp. 74-86. <http://www.elsevier.com/locate/resconrec>
- Neshat, A.; Pradhan, B.; Pirasteh, S.; Shafri, H.Z.M. (2014b). Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran. *Environmental Earth Sciences*, vol 71 (7). Springer, pp. 3119-3131. <http://link.springer.com/journal/12665>
- Neto, V.; Cardoso, C.; Rocha, F.; Gomes, C. (1998). Cartografia automática e análise estatística da superfície de topo do Cretácico inferior (Grés da Palhaça) na região de Aveiro. *Actas do V Congresso Nacional de Geologia. Tomo 84, Fascículo 1.* IGM - Instituto Geológico e Mineiro & SGP - Sociedade Geológica de Portugal. Lisboa, Portugal, pp. A-103 - A-106.
- Njitchoua, R.; Dever, L.; Fontes, J.C.; Naah, E. (1997). Geochemistry, origin and recharge mechanisms of groundwaters from the Garoua Sandstone aquifer, northern Cameroon. *Journal of Hydrology*, vol 190 (1-2). Elsevier Science Publishers B. V., Amesterdão, pp. 123-140.
- Notenboom, J.; Plénet, S.; Turquin, M.-J. (1994). Groundwater contamination and its impact on groundwater animals and ecosystems. In: Janine Gibert, Dan L. Danielopol & Jack A. Stanford (Editors). *Groundwater Ecology.* Academic Press, San Diego, pp. 477-504.
- Novo Aquilégio (2008). Inventário de nascentes portuguesas. [Consult. em 25 jan. 2010 e 31 mar. 2011]. Disponível em <http://www.aguas.ics.ul.pt/index.htm>
- Ogilvy, R.D.; Cuadra, A.; Jackson, P.D.; Cuellar, V. (1991). Delineation of a resistive drainage channel by EM conductivity survey. *Geoexploration*, vol 28. Elsevier Science Publishers B. V., Amesterdão, pp. 139-152.
- Oliveira, B.; Quinteiro, P.; Caetano, C.; Nadais, H.; Arroja, L.; Silva, E.F.; Senos Matias, M. (2013). Burial grounds' impact on groundwater and public health: an overview. *Water and Environment Journal*, vol 27 (1). Wiley, pp. 99-106. [http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1111/\(ISSN\)1747-6593](http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1111/(ISSN)1747-6593)
- Oliveira, J.; Condeso de Melo, M.T.; Figueiredo, D.; Abrantes, N.; Miguéns, F.; Ribeiro, L.; Pereira, R. (2014). Avaliação da vulnerabilidade e risco à contaminação no Maciço Calcário Estremenho. 12º Congresso da Água. APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Lisboa, Portugal. Comunicação 487, 11 pp.
- Oliveira, M.M.; Lobo-Ferreira, J.P. (1998). Cartografia automática da vulnerabilidade de aquíferos com base na aplicação do método Drastic. 4º Congresso da Água. APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Lisboa, Portugal. Comunicação 1, Disponível em CD-ROM, 15 pp.
- Ordens, C.M. (2007). Estudo da contaminação do aquífero superior na região de Estarreja. Tese de Mestrado. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 150 pp.
- Orellana, E. (1982). *Prospeccion geoelectrica en corriente continua*, Ed. 2. Parainfo, Madrid, 578 pp.
- Pacheco, F.A.L.; Fernandes, L.F.S. (2013). The multivariate statistical structure of DRASTIC model. *Journal of Hydrology*, vol 476. Elsevier, pp. 442-459. www.elsevier.com/locate/jhydrol
- Pacheco, F.A.L.; Oliveira, A.S.; Alencão, A.M.P.; Ribeiro, I.C.; Faria, M.J. (2004). Avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas pelo método DRASTIC na bacia hidrográfica do rio Sordo. 7º Congresso da Água. APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Lisboa, Portugal. Comunicação 53, Disponível em CD-ROM, 12 pp.
- Panagopoulos, G.P.; Antonakos, A.K.; Lambrakis, N.J. (2006). Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeology Journal*, vol 14 (6). Springer, pp. 894-911. <http://link.springer.com/journal/10040>
- Paralta, E.A.R.R. (2009). Utilização de modelos de recarga e técnicas isotópicas na avaliação do impacte da agricultura na qualidade da água subterrânea de zonas agrícolas. Caso de estudo no Aquífero dos Gabros de Beja. Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 271 pp.

- Parasnis, D.S. (1997). Principles of Applied Geophysics, Ed. 5. Chapman & Hall, London, 429 pp.
- Parkhurst, D.L.; Appelo, C.A.J. (1999). User's Guide to PHREEQC (Version 2) - A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. Water-Resources Investigations Report 99-4259. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Denver, Colorado, 312 pp.
- Pearson, W.C. (2001). Finding faults in a gas play. Explorer. AAPG - American Association of Petroleum Geologists. [Consult. em mar. 2014]. Disponível em <http://www.aapg.org/publications/news/explorer>
- Peixinho de Cristo, F. (1985). Estudo hidrogeológico do sistema aquífero do Baixo Vouga. Divisão de Geohidrologia, Direcção-Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos, Ministério do Equipamento Social, Coimbra, 57 pp.
- Peixinho de Cristo, F. (1998). Águas Subterrâneas no Baixo Mondego. Projecto Praxis XXI 2/2.1/CTA - 156/94.
- Penman, H.L. (1950). The water balance of the Stour catchment area. Journal of the Institution of Water Engineers, vol 4. pp. 457-469.
- Penman, H.L. (1951). The role of vegetation in meteorology, soil mechanics and hydrology. British Journal of Applied Physics, vol 2. pp. 145-151.
- Perkin-Elmer Corporation (1987). Instructions Model 2380 Atomic Absorption Spectrophotometer. Norwalk, 164 pp.
- Pina, A.F.L. (2009). Hidroquímica e qualidade das águas subterrâneas da ilha de Santiago - Cabo Verde. Tese de Doutoramento. Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro. Aveiro, 231 pp.
- Pinheiro, L.M.; Wilson, R.C.L.; Reis, R.P.; Whitmarsh, R.B.; Ribeiro, A. (1996). The Western Iberia margin: a geophysical and geological overview. In: R. B. Whitmarsh, D. S. Sawyer & D. G. Masson (Editors). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, vol 149, pp. 3-23.
- Plummer, L.N. (2007). Dating of Young Groundwater. In: Pradeep K. Aggarwal, Joel R. Gat & Klaus F.O. Froehlich (Editors). IAEA - International Atomic Energy Agency, Isotopes in the Water Cycle: Past, Present and Future of a Developing Science. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 193-218.
- Pulido Carrillo, J.L. (1978). Hidrogeologia practica. Urmo, S. A. de Ediciones, Bilbao, pp. 254-281.
- Rajmohan, N.; Elango, L. (2004). Identification and evolution of hydrogeochemical processes in the groundwater environment in an area of the Palar and Cheyyar River Basins, Southern India. Environmental Geology, vol 46 (1). Springer-Verlag, pp. 47-61. <http://link.springer.com/journal/254>
- Ramos, A.M. (2000). Organização e significado dos depósitos mais recentes da zona vestibular do Rio Mondego. Tese de Mestrado. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 143 pp.
- Rasmussen, E.S.; Lomholt, S.; Andersen, C.; Vejrbæk, O.V. (1998). Aspects of the structural evolution of the Lusitanian Basin in Portugal and the shelf and slope area offshore Portugal. Tectonophysics, vol 300. pp. 199-225.
- Reimann, C.; Caritat, P. (1998). Chemical elements in the environment: factsheets for the geochemist and environmental scientist. Springer, Berlin, 398 pp.
- Reis, R.P.; Corrochano, A.; Bernardes, C.A.; Cunha, P.P.; Dinis, J.M.L. (1992). O Meso-Cenozóico da Margem Atlântica Portuguesa. III Congreso Geológico de España & VIII Congreso Latinoamericano de Geología. Salamanca, pp. 115-138 (Excursiones).
- Reis, R.P.; Pimentel, N. (2010). Lusitanian Basin (Portugal). II Central & North Atlantic Conjugate Margins Conference: Re-Discovering the Atlantic, New winds for an old sea. vol IX - Field-trip. Lisboa, pp. 1-7.
- Rey, J.; Dinis, J.L.; Callapez, P.; Cunha, P.P. (2006). Da rotura continental à margem passiva. Composição e evolução do Cretácico de Portugal. Cadernos de Geologia de Portugal. INETI - Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, Lisboa, 74 pp.
- Reynolds, J.M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley & Sons, 796 pp.

- Ribeiro, A. (1984). Néotectonique du Portugal. Livro de Homenagem a Orlando Ribeiro, vol 1. Centro de Estudos Geográficos, Lisboa, pp. 173-182.
- Ribeiro, A. (1988). A tectónica alpina em Portugal. *Geonovas*, vol 10. Lisboa, pp. 9-11.
- Ribeiro, A. (2013). A Evolução Geodinâmica de Portugal; os ciclos Meso-Cenozóicos. In: Rui Dias, Alexandre Araújo, Pedro Terrinha & José Carlos Kullberg (Editors). *Geologia de Portugal - Geologia Meso-cenozóica de Portugal*, vol II. Escolar Editora, Lisboa, pp. 9-27.
- Ribeiro, A.; Antunes, M.T.; Ferreira, M.P.; Rocha, R.B.; Soares, A.F.; Zbyszewski, G.; Moitinho de Almeida, F.; Carvalho, D.; Monteiro, J.H. (1979). Introduction à la géologie générale du Portugal. *Serviços Geológicos de Portugal*. Lisboa, 114 pp.
- Ribeiro, A.; Cabral, J.; Baptista, R.; Matias, L. (1996). Stress pattern in Portugal mainland and the adjacent Atlantic region, West Iberia. *Tectonics*, vol 15, nº 2. pp. 641-659.
- Ribeiro, A.; Kullberg, M.C.; Kullberg, J.C.; Manuppella, G.; Phipps, S. (1990). A review of Alpine tectonics in Portugal: Foreland detachment in basement and cover rocks. *Tectonophysics*, vol 184, nº 3/4. pp. 357-366.
- Ribeiro, L. (2000). Desenvolvimento de um Índice para Avaliar a Susceptibilidade dos Aquíferos à Contaminação. Nota interna (não publicada), ERSHA - Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo & CVRM - Centro de Geo-Sistemas, 8 pp.
- Ribeiro, L. (2005). Um novo índice de vulnerabilidade específico de aquíferos: Formulação e Aplicações. 7º SILUSBA. APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Évora, Portugal. Comunicação 60P, Disponível em CD-ROM, 16 pp.
- Ribeiro, L.T. (2012). Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas do Vouga, Mondego e Lis Integradas na Região Hidrográfica 4. Caracterização Geral e Diagnóstico – Caracterização das Massas de Águas Subterrâneas. ARH do Centro, I.P. – Administração da Região Hidrográfica do Centro, I.P., 265 pp. Disponível em <http://www.apambiente.pt/>
- Ribeiro, L.T.; Gamito, T.M. (2012). Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas do Vouga, Mondego e Lis Integradas na Região Hidrográfica 4. Caracterização Geral e Diagnóstico – Caracterização Geológica e Geomorfológica. ARH do Centro, I.P. – Administração da Região Hidrográfica do Centro, I.P., 41 pp. Disponível em <http://www.apambiente.pt/>
- Rocha, F.; Gomes, C. (1992). Contribution of clay mineralogy and geochemistry for the discrimination of lower jurassic formations in the Aveiro sedimentary basin. *Geociências, Revista da Universidade de Aveiro*, vol 7 (1-2). Aveiro, pp. 75-80.
- Rocha, F.T. (1993). Argilas aplicadas a estudos litoestratigráficos e paleoambientais na bacia sedimentar de Aveiro. Tese de Doutoramento. Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro. Aveiro, 399 pp.
- Rocha, R.; Manuppella, G.; Mouterde, R.; Ruget, C.; Zbyszewski, G. (1981). Carta Geológica de Portugal - Notícia Explicativa da Folha 19-C, Figueira da Foz, escala 1/50000. *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 126 pp.
- RockWare Inc. (2008). *RockWorks 14*. Colorado, USA, 361 pp.
- Rodrigues, J.D.; Lobo-Ferreira, J.P.; Santos, J.B.; Miguéns, N. (1989). Caracterização sumária dos recursos hídricos subterrâneos de Portugal. Memória nº 735. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 31 pp.
- Sainz, A.M.C.; Faccenna, C. (2001). Tertiary compressional deformation of the Iberian plate. *Terra Nova*, vol 13. pp. 281-288.
- Sanford, W. (2011). Calibration of models using groundwater age. *Hydrogeology Journal*, vol 19 (1). Springer, pp. 13-16. <http://link.springer.com/journal/10040>
- Santos, F.M. (2006). Técnicas para investigação de estruturas superficiais - O método transiente (TDEM). *Prospecção Geofísica I*. Capítulo 4, pp. 1-11.
- Schoeller, H. (1956). *Géochimie des eaux souterraines. Application aux eaux des gisements de pétrole*. Société des Editions Technip, Paris, 213 pp.
- Secunda, S.; Collin, M.L.; Melloul, A.J. (1998). Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. *Journal of Environmental Management*, vol 54 (1). Elsevier, pp. 39-57. <http://www.journals.elsevier.com/journal-of-environmental-management/>

- Sena, C. (2007). Interacções água subterrânea – água superficial na zona da Pateira de Fermentelos (Portugal). Tese de Mestrado. Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro. Aveiro, 198 pp.
- Sener, E.; Davraz, A. (2013). Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: the case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey). *Hydrogeology Journal*, vol 21 (3). Springer, pp. 701-714. <http://link.springer.com/journal/10040>
- Sener, E.; Sener, S.; Davraz, A. (2009). Assessment of aquifer vulnerability based on GIS and DRASTIC methods: a case study of the Senirkent-Uluborlu Basin (Isparta, Turkey). *Hydrogeology Journal*, vol 17 (8). Springer, pp. 2023-2035. <http://link.springer.com/journal/10040>
- Sharma, P.V. (1997). *Environmental and engineering geophysics*. Cambridge University Press, 475 pp.
- Siegel, F.R. (2002). *Environmental geochemistry of potentially toxic metals*. Springer, Berlin, 218 pp.
- Simões, M.M.C. (1993). Águas Minerais Portuguesas - Da sua caracterização físico-química ao esboço dum classificação. *Boletim de Minas*, vol 30 (1). Lisboa, pp. 13-26.
- SMN (1975). Carta I.4.2 - Precipitação - Número de dias no ano. Atlas do Ambiente Digital - Instituto do Ambiente, 1/1000000. Serviço Meteorológico Nacional.
- SNIRH (2014a). Atlas da água. Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. [Consult. em jan. 2014]. Disponível em <http://snirh.pt/>
- SNIRH (2014b). Dados de Base. Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. [Consult. em jan. 2014]. Disponível em <http://snirh.pt/>
- Soares, A.A. (1935). Informação da Inspeção de Águas. Arquivo da Direcção de Serviços de Recursos Hidrogeológicos, Geotérmicos e Petróleo da Direcção Geral de Energia e Geologia.
- Soares, A.F. (1966). Estudo das formações pós-jurássicas da região de entre Sargento-Mor e Montemor-o-Velho (margem direita do rio Mondego). *Memórias e Notícias*, nº 62. Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol., Univ. Coimbra. Coimbra, 343 pp.
- Soares, A.F.; Barbosa, B.; Reis, R.P. (1982). Esboço de enquadramento cronostratigráfico das unidades líticas pós-jurássicas da Orla Meso-Cenozóica Ocidental entre os paralelos de Pombal e Aveiro. *Memórias e Notícias*, nº 93. Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol., Univ. Coimbra. Coimbra, pp. 77-91.
- Soares, A.F.; Cunha, L.; Marques, J.F. (1989). Depósitos quaternários do baixo Mondego: tentativa de coordenação morfogenética. 2ª Reunião do Quaternário Ibérico. vol 2. Asociacion Española para el Estudio del Cuaternario (AEQUA) & Grupo de Trabalho Português para o Estudo do Quaternário (GTPEQ), Madrid, pp. 803-812.
- Soares, A.F.; Ferreira, A.B.; Barbosa, B.; Marques, J.F. (1986). Evolução geomorfológica e sedimentológica das plataformas litorais entre o Mondego e o Vouga. A margem direita do baixo Mondego. II Congresso Nacional de Geologia. Maleo - Boletim Informativo da Sociedade Geológica de Portugal. vol 2, nº 13, Lisboa, pp. 42-43.
- Soares, A.F.; Ramos, A.M.; Marques, J.F. (1998). Os depósitos mais recentes da margem direita do Mondego entre Coimbra e Montemor-o-Velho. *Cadernos de Geografia*, nº 17. Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra. Coimbra, pp. 73-79.
- Soares, A.F.; Rocha, R.B.; Elmi, S.; Henriques, M.H.; Mouterde, R.; Almeras, Y.; Ruget, C.; Marques, J.; Duarte, L.; Carapito, M.C.; Kullberg, J. (1988). Essai d'interpretation dynamique de la paleogéographie du bassin lusitanien (secteur nord) depuis le Trias jusqu'au Dogger. III Coloquio de Estratigrafía y Paleogeografía del Jurásico de España. Instituto de Estudios Riojanos, Logroño, pp. 1-3.
- Soares, A.F.; Rocha, R.B.; Elmi, S.; Henriques, M.H.; Mouterde, R.; Almeras, Y.; Ruget, C.; Marques, J.; Duarte, L.; Carapito, M.C.; Kullberg, J.C. (1993). Le sous-bassin nord-lusitanien (Portugal) du Trias au Jurassique moyen: histoire d'un "rift avorté". *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 317, série II. Paris, pp. 1659-1666.
- Soares de Carvalho, G. (1952). Les dépôts détritiques Plio-Pleistocènes et la morphologie de la "Gândara" au nord de la Serra da Boa Viagem (Portugal). *Révue de Géomorphologie Dynamique*, nº 6. Paris, pp. 275-293.
- Soares de Carvalho, G. (1954). A Gândara (Portugal) e as Landes da Gasconha (França). *Memórias e Notícias*, nº 37. Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol., Univ. Coimbra. Coimbra, 19 pp.

- Soares de Carvalho, G. (1964). Areias da Gândara (Portugal) - Uma formação eólica quaternária. Publicações do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências do Porto, vol LXXXII, 4ª Série. Porto, 32 pp.
- Srinivasamoorthy, K.; Vasanthavigar, M.; Chidambaram, S. (2011). Characterisation of Groundwater Chemistry in an Eastern Coastal Area of Cuddalore District, Tamil Nadu. *Journal Geological Society of India*, vol 78 (6). Springer-Verlag, pp. 549-558. <http://link.springer.com/journal/12594>
- Stigter, T.Y. (2005). Integrated analysis of hydrogeochemistry and assessment of groundwater contamination induced by agricultural practices. Tese de Doutoramento. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico. Lisboa, 195 pp.
- Stigter, T.Y.; Ribeiro, L.; Carvalho Dill, A.M.M. (2006). Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology Journal*, vol 14 (1-2). Springer, pp. 79-99. <http://link.springer.com/journal/10040>
- Teixeira, C.; Gonçalves, F. (1980). *Introdução à Geologia de Portugal*. Instituto Nacional de Investigação Científica, Lisboa, 475 pp.
- Teixeira, C.; Zbyszewski, G. (1976). Carta Geológica de Portugal - Notícia Explicativa da Folha 16-A, Aveiro, escala 1/50000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 39 pp.
- Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics*, Ed. 2. Cambridge University Press, 770 pp.
- Thermo Electron Corporation (2003). *Atomic Absorption Spectrometers - Operators manual*. Cambridge, 85 pp.
- Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, vol 38 (1). pp. 55-94.
- Thornthwaite, C.W.; Mather, J.R. (1955). The water balance. *Publications in Climatology*, vol 8 (1). Centerton, NJ, 86 pp.
- Van Stempvoort, D.; Ewert, L.; Wassenaar, L. (1992). AVI: A Method for Groundwater Protection Mapping in the Prairie Provinces of Canada. PPWB Report nº 114, Groundwater and Contaminants Project, Environmental Sciences Division, National Hydrology Research Institute, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 18 pp.
- Van Stempvoort, D.; Ewert, L.; Wassenaar, L. (1993). Aquifer Vulnerability Index: A GIS - compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, vol 18 (1). pp. 25-37.
- Vías, J.M.; Andreo, B.; Perles, M.J.; Carrasco, F. (2005). A comparative study of four schemes for groundwater vulnerability mapping in a diffuse flow carbonate aquifer under Mediterranean climatic conditions. *Environmental Geology*, vol 47 (4). Springer-Verlag, pp. 586-595. <http://link.springer.com/journal/254>
- Vías, J.M.; Andreo, B.; Perles, M.J.; Carrasco, F.; Vadillo, I.; Jiménez, P. (2004). The COP method. In: François Zwahlen (Editor). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. Final report (COST Action 620) - EUR 20912. European Commission, Directorate-General for Research, Luxembourg, pp. 163-172.
- Vías, J.M.; Andreo, B.; Perles, M.J.; Carrasco, F.; Vadillo, I.; Jiménez, P. (2006). Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hydrogeology Journal*, vol 14 (6). Springer, pp. 912-925. <http://link.springer.com/journal/10040>
- Vías, J.M.; Andreo, B.; Ravbar, N.; Hötzl, H. (2010). Mapping the vulnerability of groundwater to the contamination of four carbonate aquifers in Europe. *Journal of Environmental Management*, vol 91 (7). Elsevier, pp. 1500-1510. <http://www.journals.elsevier.com/journal-of-environmental-management/>
- Vieira, R.; Fernandes, J.N.; Barbosa, A.E. (2013). Evaluation of the impacts of road runoff in a Mediterranean reservoir in Portugal. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol 185 (9). Springer, pp. 7659-7673. <http://link.springer.com/journal/10661>

- Viganotti, M.; Jackson, R.; Krahn, H.; Dyer, M. (2013). Geometric and frequency EMI sounding of estuarine earthen flood defence embankments in Ireland using 1D inversion models. *Journal of Applied Geophysics*, vol 92. Elsevier, pp. 110-120. www.elsevier.com/locate/jappgeo
- Villumsen, A.; Jacobsen, O.S.; Sonderskov, C. (1983). Mapping the vulnerability of groundwater reservoirs with regard to surface pollution. Geological Survey of Denmark, Yearbook 1982, Copenhagen, pp. 17-38.
- Vrba, J.; Civita, M. (1994). Assessment of groundwater vulnerability. In: Jaroslav Vrba & Alexander Zaporozec (Editors). *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*, vol 16. IAH - International Association of Hydrogeologists (International Contributions to Hydrogeology). Verlag Heinz Heise, Hannover, pp. 31-48.
- Vrba, J.; Zaporozec, A. (1994). Executive Summary. In: Jaroslav Vrba & Alexander Zaporozec (Editors). *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*, vol 16. IAH - International Association of Hydrogeologists (International Contributions to Hydrogeology). Verlag Heinz Heise, Hannover, pp. XV-XXIII.
- Wang, Y.; Merkel, B.J.; Li, Y.; Ye, H.; Fu, S.; Ihm, D. (2007). Vulnerability of groundwater in Quaternary aquifers to organic contaminants: a case study in Wuhan City, China. *Environmental Geology*, vol 53 (3). Springer-Verlag, pp. 479-484. <http://link.springer.com/journal/254>
- Weight, W.D.; Sonderegger, J.L. (2001). *Manual of Applied Field Hydrogeology*. McGraw-Hill, 608 pp.
- White, D.E. (1960). Summary of chemical characteristics of some waters of deep origin. Geological Survey Research 1960 - Short Papers in the Geological Sciences. U.S. Geological Survey Professional Paper 400-B, Washington, pp. B452-B454.
- White, D.E.; Hem, J.D.; Waring, G.A. (1963). Chemical composition of subsurface waters. In: Michael Fleischer (Editor). *Data of Geochemistry*, 6th. U.S. Geological Survey Professional Paper 400-F, Washington, pp. F1-F67.
- Wilson, R.C.L.; Hiscott, R.N.; Willis, M.G.; Gradstein, F.M. (1989). The Lusitanian Basin of West-Central Portugal: Mesozoic and Tertiary Tectonic, Stratigraphic and Subsidence History. In: A. J. Tankard & H. R. Balkwill (Editors). *Extensional Tectonics and Stratigraphy of the North Atlantic Margins*, vol 46. AAPG Memoir, Oklahoma, pp. 341-361.
- WTW - Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH (1994). *Microprocessor pH-meter - pH 325*. Weilheim, 67 pp.
- Yechieli, Y.; Sivan, O. (2011). The distribution of saline groundwater and its relation to the hydraulic conditions of aquifers and aquitards: examples from Israel. *Hydrogeology Journal*, vol 19 (1). Springer, pp. 71-81. <http://link.springer.com/journal/10040>
- Young, C.P.; Blackmore, K.M.; Reynolds, P.; Levens, A. (2002). *Pollution potential of cemeteries – Draft guidance*. R&D Technical Report P223, Environment Agency, Bristol, UK, 61 pp.
- Yu, C.; Yao, Y.; Hayes, G.; Zhang, B.; Zheng, C. (2010). Quantitative assessment of groundwater vulnerability using index system and transport simulation, Huangshuihe catchment, China. *Science of the Total Environment*, vol 408 (24). Elsevier, pp. 6108-6116. www.elsevier.com/locate/scitotenv
- Zaporozec, A. (1994). Concept of groundwater vulnerability. In: Jaroslav Vrba & Alexander Zaporozec (Editors). *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*, vol 16. IAH - International Association of Hydrogeologists (International Contributions to Hydrogeology). Verlag Heinz Heise, Hannover, pp. 3-7.
- Zwahlen, F.; Drew, D.; Goldscheider, N.; Hötzl, H.; Ketelaere, D.; Kralik, M.; Mudry, J.; Neale, S. (2004). Summary. In: François Zwahlen (Editor). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. Final report (COST Action 620) - EUR 20912. European Commission, Directorate-General for Research, Luxembourg, pp. III-VI.