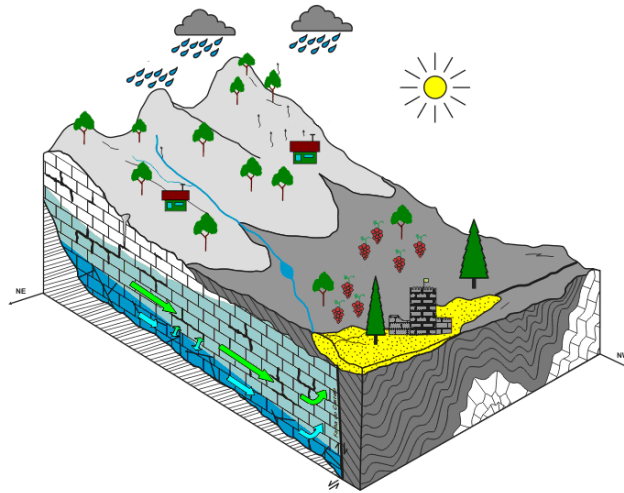




UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO



**MODELAÇÃO MATEMÁTICA DOS RECURSOS HÍDRICOS
SUBTERRÂNEOS DA REGIÃO DE MOURA**

Augusto Teixeira Marques da Costa
(licenciado)

Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Ciências da Engenharia

Orientador: Doutor Luís Filipe Tavares Ribeiro

Co-Orientador: Doutora Amélia Maria Mello de Carvalho

Júri

Presidente: Reitor da Universidade Técnica de Lisboa

Vogais: Doutora Maria José Correia Martins Matias

Doutora Amélia Maria Mello de Carvalho

Doutor José Paulo Patrício Geraldes Monteiro

Doutor Luís Filipe Tavares Ribeiro

Doutor José Manuel Vaz Velho Barbosa Marques

Janeiro de 2008

Resumo:

O sistema aquífero Moura-Ficalho é, dos aquíferos carbonatados do Alentejo, o que se situa na região com os menores índices de pluviosidade, constituindo uma área piloto de investigação destes sistemas aquíferos. É origem de abastecimento público para os concelhos de Moura e Serpa.

Pretende-se com a modelação numérica deste sistema aquífero contribuir para o desenvolvimento de ferramentas matemáticas de apoio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos, à mitigação das pressões exercidas sobre o aquífero devido às alterações climáticas.

Neste trabalho apresentam-se ensaios de aquífero e outros estudos realizados desde a década de 80 que permitiram o desenvolvimento de um modelo conceptual do funcionamento do aquífero, a avaliação da recarga, a interpretação do esgotamento de nascentes e datação de águas.

A informação existente e os dados da rede de monitorização foram integrados num modelo regional MODFLOW 2000, em regime transitório em que se simula o escoamento subterrâneo entre 1/10/2000 e 31/12/2005. Em relação a este período, o aquífero Moura-Ficalho encontra-se em sobreexploração. Os resultados obtidos são discutidos, fazendo-se uma projecção de vários cenários de evolução de níveis e caudais até 2015. São apresentadas as conclusões e perspectivam-se os trabalhos futuros, que deverão incidir sobretudo na: (1) monitorização e modelação de caudais de nascentes; (2) investigação e intensificação da recarga do aquífero.

Palavras-chave: modelo numérico, regime transitório, modelação inversa, aquífero, calibração, escoamento subterrâneo.

Abstract:

Moura-Ficalho aquifer system is, among carbonate aquifers of Alentejo, the one that is located in the most dry area, being a pilot area for all those carbonate aquifers. It is used for public supply for the municipalities of Moura and Serpa.

Numerical modelling of this aquifer system intends to contribute to mitigate pressures on the aquifer arising from future climate changes.

On this work, aquifer tests and other studies carried out in the 80's decade, that lead to the development of the conceptual model of this aquifer, the evaluation of aquifer recharge, the interpretation of spring flow rates and the evaluation of water ages, are presented and discussed.

The existing data and data coming from existing monitoring network was integrated in a regional Modflow 2000 transient model, simulating groundwater flow from 1/12/2000 until 31/12/2005. Results are discussed and a projection until 2015, about levels and flow rates, is also made. Conclusions and recommended future works are discussed, pointing out that these future investigations should concern on: (1) monitoring and modelling of spring flow rates; (2) evaluation and study of increasing recharge systems.

Keywords: numerical model, transient, Inverse modelling, aquifer, calibration, groundwater flow.

AGRADECIMENTOS

Os primeiros agradecimentos vão para o Prof. Doutor Luís Ribeiro e para a Prof.^a Doutora Amélia Dill pela ajuda, apoio e orientação que dedicaram a este trabalho.

Agradeço o apoio que tive dos colegas do Departamento de Hidrogeologia, em particular da colega Ana Paula Pereira, que me deu um apoio precioso na revisão do texto e na preparação das versões finais. Globalmente agradeço a boa vontade e ajuda de todos no sentido de me aliviar dos trabalhos em curso no Departamento, durante um largo período de tempo, possibilitando a conclusão deste trabalho. Neste particular dirijo um agradecimento muito especial à colega Carla Lourenço.

Um grande agradecimento ao colega Alain Francés que colaborou em muitas das acções desenvolvidas, no gabinete e no campo. Nas actividades de campo também estive frequentemente envolvido o colega José Alexandre, a quem também dirijo os meus agradecimentos.

Um sentido agradecimento ao Professor Doutor Costa Almeida com quem sempre pude contar nos problemas mais delicados.

Finalmente, mas não por ser o menos importante, um muito obrigado à minha esposa pelo apoio que sempre me deu para ultrapassar todas as dificuldades.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS ANTERIORES	5
3	OBJECTIVOS.....	7
4	ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO E INDICADORES ESTATÍSTICOS CONCELHIOS	9
5	ENQUADRAMENTO GEOMORFOLÓGICO, ESTRUTURAL E TECTÓNICO.....	15
6	GEOLOGIA	21
6.1	SOCO VARISCO.....	21
6.1.1	Série Negra	25
6.1.2	Formação Dolomítica	25
6.1.3	Complexo vulcano-sedimentar Ficalho-Moura	26
6.1.4	Complexo Vulcano-Sedimentar de Moura - Santo Aleixo (Formação de Xistos de Moura)	28
6.1.5	Formação de Ossa.....	29
6.1.6	Formação de Barrancos.....	30
6.1.7	Formação de Santa Iria (DSI)	31
6.2	TERCIÁRIO E HOLOCÉNICO	31
6.2.1	Conglomerados, arenitos, margas com concreções calcárias e argilas, às vezes, com atapulgite	31
6.2.2	Argilas, margas, calcários e conglomerados.....	32
6.2.3	Ranhas do Baixo Alentejo.....	33
6.2.4	Terraços fluviais	33
6.2.5	Aluviões.....	33
6.2.6	A Bacia de Moura – Marmelar.....	33
6.3	ROCHAS MAGMÁTICAS INTRUSIVAS	35
6.3.1	Granitos.....	35
6.3.2	Pórfiros de Baleizão	36
6.3.3	Complexo gabro-diorítico de Cuba.....	36

6.3.4	Rochas intrusivas filonianas.....	36
7	CLIMA	37
7.1	INTRODUÇÃO	37
7.2	BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO.....	37
7.3	CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA	44
7.4	ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS.....	45
8	SISTEMA AQUÍFERO MOURA-FICALHO	49
8.1	AQUÍFERO MOURA-FICALHO.....	49
8.2	AQUÍFERO MOURA-BRENHAS.....	61
8.3	AQUÍFERO DOS «CALCÁRIOS DE MOURA»	62
8.4	AQUÍFERO DA RIBEIRA DA TOUTALGA	63
8.5	OUTRAS FORMAÇÕES AQUÍFERAS.....	63
9	RECARGA DO AQUÍFERO MOURA-FICALHO.....	65
9.1	TRAÇADORES QUÍMICOS	65
9.2	ESTIMATIVA DA RECARGA COM O MODELO EARTH.....	66
9.2.1	Cálculo da Evapotranspiração Potencial Diária	68
9.2.2	Calibração e análise de sensibilidade	70
9.2.3	Valores de recarga	73
10	HIDROGEOQUÍMICA.....	75
10.1	CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA DO SISTEMA AQUÍFERO MOURA-FICALHO	75
10.2	EVOLUÇÃO HIDROQUÍMICA.....	78
10.3	DATAÇÕES DE ÁGUAS	79
11	MODELOS LOCAIS (ANALÍTICOS E SEMI-ANALÍTICOS)	83
11.1	INTRODUÇÃO	83
11.2	TÉCNICAS DE INTERPRETAÇÃO.....	84
11.2.1	Regime permanente - Método de Thiem.....	84

11.2.2	Regime transitório	85
11.2.3	Interpretação de situações particulares.....	89
11.3	ENSAIOS EFECTUADOS NA REGIÃO	99
11.3.1	Ensaio no poço da mina da Preguiça	100
11.3.2	Ensaio na Herdade das Cortes (Vale de Vargo)	104
11.3.3	Ensaio no Casal das Boieiras (Moura)	107
11.3.4	Ensaio no Gargalão.....	115
11.3.5	Ensaio em Fonte da Telha	124
11.3.6	Ensaio no Casal de Santo André (SDM11)	126
11.3.7	Ensaio em Póvoa de S. Miguel	132
11.3.8	Ensaio na Horta da Cristina.....	136
11.4	SÍNTESE DE RESULTADOS.....	140
12	MODELAÇÃO NUMÉRICA DE FLUXO.....	143
12.1	MODELAÇÃO DE AQUÍFEROS CÁRSICOS.....	143
12.2	FORMULAÇÃO EM DIFERENÇAS FINITAS UTILIZANDO O SOFTWARE MODFLOW ...	144
12.2.1	Condutância hidráulica.....	147
12.2.2	Armazenamento	152
12.3	CALIBRAÇÃO E MODELAÇÃO INVERSA	154
13	MODELO REGIONAL DO AQUÍFERO MOURA-FICALHO	159
13.1	DADOS DE BASE	159
13.1.1	Recarga.....	159
13.1.2	Níveis piezométricos	163
13.1.3	Nascentes e descargas ocultas.....	165
13.1.4	Furos de captação.....	166
13.2	EVOLUÇÃO DO MODELO MOURA-FICALHO E DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL.....	172
13.2.1	Modelo dobrado	172

13.2.2	Modelo simples	177
13.3	MODELO MF38.....	181
13.3.1	Calibração e resultados obtidos	181
13.3.2	Balanço hídrico.....	186
13.4	PROJECÇÃO DA SIMULAÇÃO DO AQUÍFERO ATÉ 2015	188
13.5	MEDIDAS CONTRA A SOBREEXPLORAÇÃO	192
13.5.1	Restrições na captação.....	193
13.5.2	Intensificação da recarga natural	194
13.5.3	Recarga artificial.....	198
13.6	DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	201
14	CONCLUSÕES	203
	Referências bibliográficas.....	207

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Sistemas aquíferos cársicos do soco varisco do Alentejo	1
Figura 4.1 – Localização do Sistema Aquífero Moura-Ficalho.	13
Figura 4.2– Enquadramento geográfico e administrativo dos principais aquíferos da região.....	14
Figura 5.1 - Modelo digital do terreno (sobreelevação de 10x,) com indicação dos contornos dos principais aquíferos da região	17
Figura 6.1 - Mapa geológico da região, com indicação dos contornos do Sistema Aquífero Moura-Ficalho.	32
Figura 6.2 - Divisões tectono – estratigráficas da Zona de Ossa Morena, em Portugal (Oliveira et al, 1991)	25
Figura 6.3 - Sequência estratigráfica simplificada do Sector de Montemor-Ficalho (Oliveira et al, 1991)	26
Figura 6.4 - Unidades definidas no troço do Sector do Anticlinal de Moura – Ficalho, coberto pela geotransversal do rio Guadiana (adaptado de Araújo, 1989 in Araújo, 1995)	29
Figura 6.5 - Modelo litoestratigráfico da Bacia Moura–Marmelar (adaptado de Brum da Silveira, 1990)	34
Figura 7.1 Estações climatológicas utilizadas na caracterização climática da região e respectivos polígonos de Theissen..	38
Figura 7.2 Balanço da água no solo – Moura	39
Figura 7.3 Balanço da água no solo – Amieira	40
Figura 7.4 Balanço da água no solo – Monte da Torre.....	41
Figura 7.5 Balanço da água no solo - Contenda	42
Figura 7.6 Balanço da água no solo – Amareleja	43
Figura 7.7 - Alteração na temperatura média anual em 2100, segundo o modelo HadRM2. (in Santos et al., 2002)	46
Figura 7.8 Alteração na precipitação no ano 2100, segundo o modelo HadRM2 (in Santos et al., 2002).	46
Figura 7.9 Distribuição da precipitação mensal, segundo o modelo HadCM3 (in Santos et al., 2002).	47
Figura 7.10 Distribuição da precipitação mensal, segundo o modelo HadRM2 (in Santos et al., 2002).	47
Figura 8.1 Sistema Aquífero Moura-Ficalho.	51
Figura 8.2 Modelo conceptual da geometria tridimensional do aquífero Moura-Ficalho, considerando duas camadas, a verde e a azul. Em tom amarelado representa-se a camada confinante	51

Figura 8.3 Bloco diagrama simplificado do aquífero Moura-Ficalho	55
Figura 8.4 Localização dos piezómetros e dos postos udométricos utilizados na modelação do escoamento.....	59
Figura 8.5 Perfil interpretativo do aquífero Moura-Brenhas	62
Figura 9.1 Fluxograma do modelo EARTH (adaptado de van der Lee (1990) in Chomba, 2004)	67
Figura 9.2 Áreas de influência das estações climatológicas consideradas.	68
Figura 9.3 Distribuição temporal dos vários parâmetros climatológicos nas estações da região (adaptado de Chomba, 2004).....	69
Figura 10.1 - Rede de monitorização da qualidade e pontos de água amostrados em Setembro de 2006.....	76
Figura 10.2 - Participação de cada uma das camadas para o fluxo total do aquífero Moura-Ficalho entre 1 de Outubro de 2000 e 31 de Dezembro de 2005 (segundo o modelo MF38).....	81
Figura 11.1 Bombagem no poço da mina da Preguiça, com identificação de vários efeitos que afectaram os níveis observados.....	91
Figura 11.2 Simulação da bombagem e recuperação sem qualquer barreira. Considerada uma transmissividade de 37 m ² /dia e o coeficiente de armazenamento 8,51 x 10 ⁻⁵	93
Figura 11.3 Linhas piezométricas simuladas no final da bombagem, considerando a transmissividade de 37 m ² /dia e o coeficiente de armazenamento de 8,51 x 10 ⁻⁵ (sem barreira).....	94
Figura 11.4 Simulação da bombagem e recuperação com a barreira situada a uma distância de 101,5 m do piezómetro.....	95
Figura 11.5 Linhas piezométricas no final da bombagem, considerando T= 37 m ² /dia e S= 8,51 x 10 ⁻⁵ , influenciadas pela barreira	95
Figura 11.6 Rebaixamentos observados e simulados no piezómetro H25 durante a bombagem, do ensaio das Boeiras (Moura).....	96
Figura 11.7 Rebaixamentos observados e simulados no piezómetro H25 durante a recuperação, do ensaio das Boeiras (Moura).....	96
Figura 11.8 Locais onde se fizeram os ensaios de aquífero.	99
Figura 11.9 Local dos trabalhos (extracto das folhas 513 e 524 da Carta Militar de Portugal, na escala 1/25.000).....	100
Figura 11.10 Interpretação da bombagem no poço da mina	102
Figura 11.11 Projecção semilogarítmica dos rebaixamentos residuais (em recuperação).....	103
Figura 11.12 Local dos trabalhos (extracto da folha 524 da Carta Militar de Portugal, na escala 1/25.000)	104

Figura 11.13 Gráfico semi-logarítmico e interpretação dos ensaios de bombagem nos três furos da Herdade das Cortes	106
Figura 11.14 Local dos trabalhos (extracto das folhas 501 e 512 da Carta Militar de Portugal, na escala 1/25.000)	107
Figura 11.15 Rebaixamentos na própria captação durante a bombagem	110
Figura 11.16 Rebaixamentos no piezómetro H25, durante a bombagem em F24	110
Figura 11.17 Níveis na captação F24, em recuperação	111
Figura 11.18 Níveis no piezómetro H25, em recuperação.	112
Figura 11.19 Recuperação em H26, após bombagem a caudal variável.	113
Figura 11.20 Perfil hidrogeológico interpretativo das condições existentes, na ausência de bombagens (adaptado de Costa, 1992).	114
Figura 11.21 Localização das captações de Gargalão num extracto da carta militar n.º 524.....	115
Figura 11.22 Interpretação da evolução de níveis, na bombagem, em F1.....	117
Figura 11.23 Interpretação da evolução de níveis, na recuperação, em F1	118
Figura 11.24 Interpretação da evolução de níveis na bombagem de F1, em H1.	119
Figura 11.25 Interpretação da evolução de níveis na recuperação, em H1	120
Figura 11.26 Simulação do escoamento e condições de fronteira no final da bombagem em F1... ..	121
Figura 11.27 Simulação do escoamento da Ribeira de S. Pedro durante os ensaios de bombagem e recuperação.....	122
Figura 11.28 - Evolução de níveis em F1, com indicação das medições a tracejado.....	123
Figura 11.29 - Evolução de níveis em H1, com indicação das medições a tracejado	123
Figura 11.30 Localização dos furos de abastecimento da Fonte da Telha (extracto da folha 512 da Carta Militar 1/25.000, ampliada para a escala 1/10.000	124
Figura 11.31 Interpretação de ensaio em regime estacionário pelo método de Thiem	125
Figura 11.32 Local dos trabalhos (extracto da folha 512 da Carta Militar de Portugal, na escala 1/25.000)	126
Figura 11.33 Linhas piezométricas do modelo SDM_0, em regime permanente	127
Figura 11.34 Transmissividade no domínio de simulação calculada por modelação inversa em regime permanente com o modelo SDM_0R	128
Figura 11.35 Variação de caudal observada e simulada na sondagem SDM11, com base nos modelos SDM_T0 e SDM_T0R	129
Figura 11.36 Transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S) no domínio de simulação calculada por modelação inversa em regime transitório com o modelo SDM_T0R.....	130

Figura 11.37 Local dos trabalhos (extracto das folhas 492 e 502 da Carta Militar de Portugal, na escala 1/25.000).....	132
Figura 11.38 Interpretação pelo método de Jacob	133
Figura 11.39 Interpretação pelo método de Theis.	134
Figura 11.40 - Recuperação de níveis na captação	135
Figura 11.41 Extracto da folha 501 da Carta Militar de Portugal na escala 1/25.000, com indicação do local dos ensaios.....	136
Figura 11.42 Evolução do rebaixamento no piezómetro durante a bombagem	137
Figura 11.43 Evolução do rebaixamento residual no piezómetro, durante a recuperação	138
Figura 12.1 Cálculo da condutância através de uma série de prismas (Harbaugh et al, 2000).....	148
Figura 12.2 Cálculo da condutância vertical entre dois nós de células (Harbaugh et al, 2000).....	151
Figura 13.1 - Áreas de influência das estações udométricas e divisão dos polígonos de recarga.	161
Figura 13.2 – Piezómetro SDTrêsBicas (vistas exterior e interior).	164
Figura 13.3 – Manutenção no piezómetro Rosa da Lavada (RL).	164
Figura 13.4 – Localização de nascentes e descargas ocultas.	167
Figura 13.5 – Evolução dos caudais (m ³ /dia) captados nas origens Fonte da Telha e Gargalão .	168
Figura 13.6 – Evolução de caudal (m ³ /dia) de furos tipo Herdade dos Machados e furo de rega de olival.	169
Figura 13.7 – Caudais (m ³ /dia) dos tipos furo de abastecimento agrícola e rega e furo horta.	170
Figura 13.8 – Localização dos furos, classificados pelos respectivos caudais médios durante todo o período de simulação.	171
Figura 13.9 - Sólidos gerados no ambiente GIS, utilizando tins criadas em ArcView.....	173
Figura 13.10 – Sólidos gerados em ambiente ArcGIS com base em sondagens virtuais.	173
Figura 13.11 - Malha de células utilizada no modelo dobrado.	174
Figura 13.12 – Representação dos quatro domínios, P1 a P4, em que foram subdivididas cada uma das camadas 1 e 2.	175
Figura 13.13 - Malha de células da camada 1 do modelo dobrado.	177
Figura 13.14 – Malha de células das camadas 1 (verde) e 2 (azul) do modelo simples.	178
Figura 13.15 – Distribuição espacial dos “pilot points” utilizados na optimização da condutividade hidráulica das camadas 1 e 2.....	179
Figura 13.16 - Evolução de níveis, com indicação dos valores observados (_obs) e simulados pelos modelos dobrado (_d) e simples (_s).....	180
Figura 13.17 – Erros médios de simulação do modelo MF38.	181

Figura 13.18 – Níveis piezométricos simulados, pelos modelos MF38 e simples (_s) e observados.	182
Figura 13.19 – Mapa de transmissividade da camada 1 (modelo MF38).	184
Figura 13.20 – Mapa de transmissividade da camada 2 (MF38).	184
Figura 13.21 – Capacidade de armazenamento do aquífero Moura-Ficalho, por camadas e por polígonos, segundo o modelo MF38.	185
Figura 13.22 – Caudais envolvidos no modelo MF38, ao longo de toda a simulação.	186
Figura 13.23 - Balanço entre os caudais médios mensais de recarga e de água saída por células do tipo furo e células do tipo dreno.	187
Figura 13.24 - Balanço cumulativo entre os volumes de água entrada e saída.	187
Figura 13.25 - Níveis simulados até 2015, nos piezômetros da zona norte do aquífero.	189
Figura 13.26 - Níveis simulados até 2015, nos piezômetros da zona sul do aquífero.	189
Figura 13.27 - Diferenças de níveis piezométricos em relação ao período 2000/05, segundo o modelo MF0015.	190
Figura 13.28 - Evolução das descargas naturais (nascentes + descargas ocultas) do aquífero Moura-Ficalho.	191
Figura 13.29 - Evolução das descargas através das três principais nascentes do aquífero Moura-Ficalho.	192
Figura 13.30 - Balanço total cumulativo considerando as restrições na exploração do aquífero. ...	194
Figura 13.31 - Perfil esquemático de um furo de recarga.	195
Figura 13.32 - Localização dos furos de recarga (R1 a R4) e respectivas sub-bacias de influência.	197
Figura 13.33 - Balanço total cumulativo considerando caudais dos furos de recarga de 0%, 20% e 25% da água total caída nas bacias de influência dos furos de recarga.	198
Figura 13.34 - Localização dos furos de recarga artificial (RA1 a RA4), localizados próximo do limite sul do futuro perímetro de rega de Machados (segundo informação da EDIA).	199
Figura 13.35 - Localização dos furos de recarga artificial (RA1 a RA4), em zonas mais afastadas do perímetro de rega de Machados.	200

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – População residente nas freguesias dos concelhos de Moura e Serpa, segundo Censos 2001.	9
Tabela 4.2 – Consumos e totais captados para o abastecimento público em 2003, em Moura e Serpa.	10
Tabela 4.3 – Importância económica e social dos sectores de actividade	10
Tabela 7.1 – Balanço mensal da água no solo (Moura).	39
Tabela 7.2 – Balanço mensal da água no solo (Amieira).	40
Tabela 7.3 – Balanço mensal da água no solo (Monte da Torre).	41
Tabela 7.4 – Balanço mensal da água no solo (Contenda).	42
Tabela 7.5 – Balanço mensal da água no solo (Amareleja).	43
Tabela 7.6 – Caracterização climática das estações com base no balanço da água no solo.	44
Tabela 9.1 – Valores paramétricos relativos ao piezómetro Cerro das Canas.	71
Tabela 9.2 – Valores paramétricos relativos ao piezómetro Lameira 2.	71
Tabela 9.3 – Valores paramétricos relativos ao piezómetro Palhais.	72
Tabela 9.4 – Valores paramétricos relativos ao piezómetro Rosa da Lavada.	72
Tabela 9.5 – Valores paramétricos relativos ao piezómetro Vale de Vargo.	73
Tabela 9.6 – Valores considerados por Chomba (coluna A) e por Alain Francés (coluna B) nos modelos EARTH.	74
Tabela 10.1 - Estatísticos básicos principais das amostragens entre Março de 1997 e Maio 2005 ..	78
Tabela 10.2 – Datações por radiocarbono e teores em trítio.	80
Tabela 11.3.1 – Níveis medidos e rebaixamentos calculados no Poço da Mina na bombagem.	101
Tabela 11.3.2 – Níveis medidos e rebaixamentos calculados no Poço da Mina na recuperação. ..	102
Tabela 11.3.3 – Níveis e rebaixamentos calculados em Herdade das Cortes, nas bombagens.	105
Tabela 11.3.4 – Distâncias e rebaixamentos dos furos de Herdade das Cortes.	105
Tabela 11.3.5 – Características dos locais de observação piezométrica (Casal das Boieiras).	108
Tabela 11.3.6 – Rebaixamentos em F24 durante a bombagem no próprio furo.	108
Tabela 11.3.7 - Rebaixamentos em H25 durante a bombagem de F24.	109
Tabela 11.3.8 – Declives, coeficientes de correlação e transmissividades calculadas pelo método de Jacob.	109
Tabela 11.3.9 – Resultados do programa Pumptest.	111
Tabela 11.3.10 – Rebaixamento residual em recuperação.	111
Tabela 11.3.11 – Bombagem em F26.	112
Tabela 11.3.12 – Níveis em F1 durante a bombagem.	116
Tabela 11.3.13 – Recuperação de níveis em F1.	118

Tabela 11.3.14 – Níveis em H1 durante a bombagem em F1.	119
Tabela 11.3.15 – Recuperação de níveis em H1 (Gargalão).	120
Tabela 11.3.16 – Níveis estáticos e dinâmicos nos furos antigos de Fonte da Telha.	125
Tabela 11.3.17 – Caudais observados e simulados com os modelos SDM_T0 e SDM_T0R.	130
Tabela 11.3.18 - Níveis e rebaixamentos durante a bombagem na Póvoa de S. Miguel.	133
Tabela 11.3.19 - Níveis e rebaixamentos durante a recuperação de níveis na Póvoa de S. Miguel.	134
Tabela 11.3.20 - Níveis e rebaixamentos durante a bombagem em F20/501 (Horta da Cristina)...	137
Tabela 11.3.21 - Recuperação de níveis em F20/501 (Horta da Cristina).....	138
Tabela 11.4.1 - Síntese dos resultados obtidos com os ensaios da região.	140
Tabela 13.1 - Valores anuais de precipitação considerados.	160
Tabela 13.2 - Nascentes do aquífero consideradas nos modelos regionais como drenos.....	166
Tabela 13.3 - Valores de cedência específica e de armazenamento específico otimizados para os polígonos.	183
Tabela 13.4 - Volumes de água envolvidos no modelo regional.	185
Tabela 13.5 - Balanço hídrico anual do armazenamento no período de simulação.	188
Tabela 13.6 - Áreas das sub-bacias de influência dos furos de recarga (R1 a R4).....	196

1 INTRODUÇÃO E ESTRUTURA DA TESE

O Alentejo é uma das regiões do País com maiores carências hídricas. Neste quadro assumem particular relevância, não só no abastecimento de água para consumo humano como no abastecimento das principais actividades económicas e no equilíbrio de vários ecossistemas, os sistemas aquíferos carbonatados do soco antigo. Na Figura 1.1 representam-se os principais sistemas aquíferos cársicos do soco antigo desta região, podendo observar-se que o Sistema Aquífero Moura-Ficalho, objecto de estudo da presente tese, é o que se situa mais a sul e no interior.

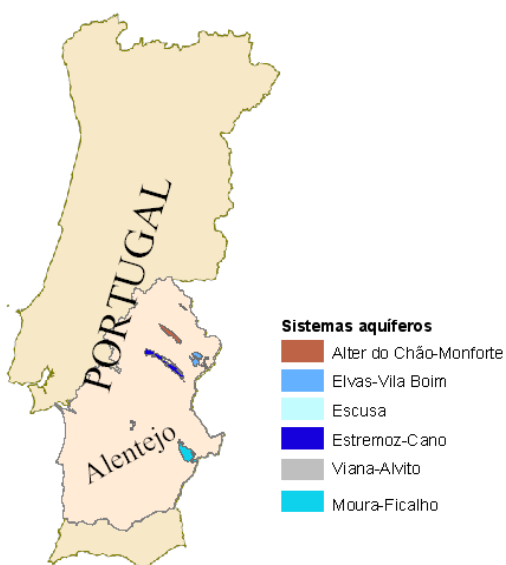


Figura 1.1 - Sistemas aquíferos cársicos do soco varisco do Alentejo

No quadro das alterações de clima que se prevêem em particular no *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Christensen *et al*, 2007), a região do Alentejo estará sujeita a aumentos na temperatura média anual e a diminuições na precipitação média anual, bem como a alterações na distribuição destes parâmetros climáticos ao longo do ano. Neste cenário de futuro próximo, a recarga dos aquíferos cársicos irá sofrer uma redução, particularmente acentuada no Sistema Aquífero Moura-Ficalho, que se poderá considerar como uma área piloto em relação ao conjunto dos aquíferos cársicos do soco varisco do Alentejo.

O Sistema Aquífero Moura-Ficalho está actualmente sujeito a pressões e condicionantes diversas. Assim, além de ser origem do abastecimento público de vários aglomerados populacionais dos concelhos de Moura e Serpa, é explorado pela agricultura, pecuária e indústria da região, sendo igualmente importante para o equilíbrio de vários ecossistemas. Tem sido ainda explorado pela indústria de engarrafamento de águas (Água de Pisões-Moura) e pela indústria do termalismo (Termas de Santa Comba e Três Bicas).

Nos últimos anos a pressão sobre este sistema aquífero tem aumentado, sobretudo a partir de 2004 com a reconversão do olival e vinha tradicionais em sistemas intensivos, com rega gota a gota. No que respeita ao abastecimento público, apesar da introdução da barragem do Enxoé como origem de abastecimento para o concelho de Serpa, os problemas de qualidade que esta origem tem apresentado, tem impedido a redução de extracções do aquífero que seria de esperar. Por outro lado, no que respeita ao concelho de Moura, perspectiva-se a substituição da origem superficial do Ardila por furos já construídos no aquífero Moura-Ficalho.

Na presente tese são apresentados diversos modelos matemáticos locais, analíticos, semi-analíticos e numéricos, utilizados no sentido de se interpretar diversas características do fluxo hídrico subterrâneo. É igualmente apresentado um modelo regional de diferenças finitas do principal aquífero da região, em regime transitório que, por um lado representa quantitativamente o escoamento hídrico subterrâneo deste aquífero e por outro é utilizado na simulação de vários cenários de exploração do mesmo, incluindo as soluções propostas para fazer face ao efeito combinado da intensificação da exploração do aquífero e dos efeitos das alterações climáticas.

O *software* utilizado consistiu essencialmente no *Modflow 2000* (Harbaugh *et al.*, 2000), programa de modelação numérica do escoamento subterrâneo pelo método de diferenças finitas, com a interface *Groundwater Modeling System (GMS, 2004)*, com o qual também foram implementados diversos modelos locais úteis, não só para a caracterização hidráulica local do escoamento subterrâneo, como para a validação de técnicas interpretativas, baseadas em modelos analíticos e semi-analíticos, de vários tipos de ensaios de aquífero.

A presente tese aborda, depois da presente introdução (capítulo 1), os seguintes capítulos:

- Capítulo 2, sobre "Estudos Hidrogeológicos anteriores", em que se faz uma referência a alguns trabalhos anteriores ao nível de toda a região do Alentejo e em particular sobre os principais sistemas aquíferos da região, em que se inclui o sistema aquífero Moura-Ficalho. Referem-se em particular alguns trabalhos recentes em que foram utilizadas técnicas de modelação numérica, quer no sistema aquífero dos Gabros de Beja (Duque, 2005), quer no aquífero carbonatado de Castelo de Vide (Monteiro, 2001).
- Capítulo 3, sobre "Objectivos", em que se apresenta o objectivo central da presente tese, que consiste no desenvolvimento de diferentes tipos de modelos matemáticos de escoamento subterrâneo, a diferentes escalas locais e regionais, na comparação de resultados obtidos e na apresentação de projecções que visam a caracterização da situação actual do principal aquífero da região e a análise de diferentes cenários de evolução até 2015, de acordo com diversas intervenções que se propõem para a gestão deste aquífero.
- Capítulo 4, sobre "Enquadramento geográfico e indicadores estatísticos concelhios", no qual se faz o enquadramento geográfico e administrativo da área de estudo, bem como a caracterização

demográfica económica e social dos dois concelhos envolvidos (Moura e Serpa).

- Capítulo 5, sobre "Enquadramento geomorfológico, estrutural e tectónico", no qual se faz o enquadramento e caracterização da área de estudos nos aspectos enunciados. Além do relevo orientado segundo a direcção hercínica e ligeiramente convergente em direcção à zona de Moura relacionado com características litológicas e estruturais da zona, merecem uma referência particular diversos aspectos relacionados com formas cársticas identificadas na região, que configuram uma evolução carsológica complexa e carecendo de investigação mais aprofundada e multidisciplinar.

- Capítulo 6, sobre "Geologia", no qual se descreve a Geologia da região, apresentando-se o respectivo mapa geológico e caracterizando as várias formações cartografadas. Também é apresentado o enquadramento tectónico e estrutural da região.

- Capítulo 7, sobre "Clima", no qual se faz uma classificação climática da zona com base no cálculo da evapotranspiração potencial e no balanço sequencial mensal da água no solo, de um conjunto de estações climatológicas com séries temporais longas. Após esta caracterização média relativa a períodos de 14 a 21 anos, essencialmente da segunda metade do século XX, é apresentada uma síntese das principais conclusões quanto à previsão de evolução climática, o mais possível centrada nesta zona do Alentejo.

- Capítulo 8, sobre "Sistema Aquífero Moura-Ficalho", no qual se faz uma caracterização deste sistema aquífero, com a apresentação do respectivo mapa de aquíferos identificados na região, caracterizando cada um nos vários aspectos como a recarga, fluxos, caracterização hidráulica e hidrogeoquímica sumária. São caracterizadas as relações hidráulicas dos vários aquíferos e de zonas de maior aptidão aquífera, que ainda carecem de investigações mais detalhadas.

- Capítulo 9, sobre "Recarga do aquífero Moura-Ficalho", no qual se apresentam alguns resultados obtidos com vista à caracterização da recarga deste aquífero com base no balanço de cloretos, que se revelaram inconclusivos. Apresentam-se também os trabalhos desenvolvidos por Chomba (2004), posteriormente continuados por Alain Francés, que justificam investigações a desenvolver num futuro próximo no sentido de rever, provavelmente em baixa, o valor provisoriamente admitido de 38% da precipitação.

- Capítulo 10, sobre "Hidrogeoquímica", no qual se faz uma síntese dos principais trabalhos desenvolvidos neste domínio, apresentando-se em particular os aspectos em que a hidrogeoquímica contribui para o modelo conceptual de funcionamento do sistema hídrico em presença. Neste sentido, são incluídos neste capítulo os dados de química isotópica obtidos na região que, apesar de escassos, contribuem para a interpretação, em particular dos fluxos hídricos em profundidade. É também um campo promissor a incluir em trabalhos futuros.

- Capítulo 11, sobre "Modelos locais (analíticos e semi-analíticos)", no qual são apresentados e aplicados diversos modelos analíticos e semi-analíticos nos diversos locais em que se realizaram

vários tipos de ensaios de aquífero. Além disso são também confrontados e discutidos os resultados destes modelos com modelos numéricos de diferenças finitas desenvolvidos e calibrados para alguns destes ensaios, a uma escala local.

- Capítulo 12, sobre "Modelação numérica de fluxo", no qual são apresentadas algumas abordagens possíveis para a interpretação do fluxo subterrâneo em meios cársicos, apresentando-se sumariamente os fundamentos em que se baseia a aplicação *Modflow*, (McDonald e Harbaugh, 1984) seleccionada para o desenvolvimento de alguns modelos regionais e locais desenvolvidos para esta região. São apenas descritos sumariamente os módulos envolvidos nas aplicações feitas. Também é referida a modelação inversa utilizada na calibração dos modelos, em particular o programa *PEST* (Doherty, 2002) mais intensivamente utilizado.

- Capítulo 13, sobre "Modelo regional do aquífero Moura-Ficalho", no qual se apresentam os dados de base utilizados, a calibração alcançada em vários modelos regionais desenvolvidos até se alcançar a melhor calibração com o modelo *MF38*. São calculados os volumes totais de armazenamento deste modelo e faz-se o balanço mensal do período entre 1 de Outubro de 2000 e 31 de Dezembro de 2005. Caracteriza-se a situação deste aquífero e fazem-se projecções de vários cenários de evolução até 2015. São identificados vários problemas que se prevê que poderão surgir e propõem-se medidas correctivas. A eficiência de cada uma também é avaliada com projecções de cenários até 2015.

- Capítulo 14, sobre "Considerações finais", no qual são apresentados os principais resultados obtidos com a presente tese e são identificados os trabalhos a desenvolver num futuro próximo.

2 ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS ANTERIORES

A importância dos aquíferos cársicos na região sul do País há muito que é reconhecida (Costa, 1985). Alguns projectos recentes, nomeadamente o Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo (ERHSA, 2001), evidenciam essa importância numa região com carências hídricas acentuadas como é o Alentejo.

Um dos sistemas aquíferos cársicos do Alentejo, designado por “Calcários de Escusa” ou “Aquífero carbonatado de Castelo de Vide” foi objecto de um aprofundado trabalho de simulação do escoamento, utilizando diferentes tipos de modelos analíticos e numéricos, a diferentes escalas, demonstrando a validade e o âmbito de aplicação destes diferentes modelos a este aquífero cársico (Monteiro, 2001). Também o sistema aquífero dos Gabros de Beja foi objecto de modelação do escoamento, utilizando um modelo de diferenças finitas, neste caso em regime permanente (Duque, 2005).

No trabalho “Sistemas Aquíferos de Portugal Continental” (Almeida et al, 2000), faz-se uma síntese dos sistemas aquíferos identificados, e referem-se vários sistemas aquíferos cársicos do Alentejo, entre os quais o Sistema Aquífero Moura-Ficalho, sobre o qual incide o presente trabalho.

A primeira hipótese quanto à origem das “Águas de Moura” encontra-se num interessante livro intitulado *As águas minero-medicinaes de Moura* (Silva e Acabado 1903). Aí refere-se, em relação à nascente de Santa Comba “... e a que pela maior parte o terreno desce em redor do Castello, afirma-se que a sua origem é a serra de Ficalho ou Serra Alta ...”. Afirma-se ainda que “ A realizar-se esta conjectura, a agua seria conduzida da Serra Alta até Moura por um enorme syphão. Constituido por uma camada permeavel, comprehendida entre duas camadas que o não são, subjacente ao grande valle intermedio, dissolvendo n’este extenso percurso os elementos mineralisadores. Compete á geologia determinar se esta hypothese é real ou não.”.

Durante quase um século esta questão esteve sem resposta. De facto durante a década de 50 encontra-se apenas algumas referências, mais ou menos dispersas e parcelares à água subterrânea da região, em relatórios e publicações mineiras e nos relatórios das sondagens, realizadas na década de 50, para a construção dos furos de abastecimento originais de Fonte da Telha, Gargalão e Herdade das Cortes.

Na sequência de vários estudos na década de 80 sobre diferentes aspectos hidrogeológicos da região (Costa, 1985 e Costa, 1988), surge o primeiro trabalho que apresenta um modelo conceptual de funcionamento hidráulico de todo o sistema aquífero intitulado *Sistemas Aquíferos da região de Moura* (Costa, 1991), que, no essencial, confirmam as conjecturas apresentadas em 1903.

Com o investimento feito durante o ERHSA na região de Moura, foi possível refinar os conhecimentos sobre a região, confirmando, no essencial, o modelo conceptual anteriormente proposto. Realizaram-se centenas de metros de sondagens, muitas das quais carotadas, que

aprofundaram os conhecimentos relativos à terceira dimensão dos aquíferos. Estas sondagens foram aproveitadas para a instalação de uma rede de monitorização piezométrica. Também a rede de monitorização da precipitação foi melhorada com dois novos postos udométricos.

No âmbito da colaboração entre o ex-IGM e o ITC (International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation) foram desenvolvidos diversos trabalhos de prospecção geofísica na região, o mesmo sucedendo em relação à colaboração com a Universidade do Algarve. Pela sua natureza tais trabalhos saem fora do âmbito da presente tese, muito embora tenham sido importantes para o desenvolvimento dos trabalhos. Além de vários relatórios, foram apresentados alguns desses resultados em encontros científicos (Sporry, *et al.*, 1997, Dill *et al.*, 1998, Roy, *et al.*, 1999).

O projecto “Metodologias para a definição do Parque Natural Hidrogeológico de Moura”, no âmbito do qual se insere a presente tese, desenvolveu várias ferramentas matemáticas de apoio à gestão do sistema aquífero Moura-Ficalho, susceptíveis de serem utilizadas noutros sistemas similares (Ribeiro *et al.*, 2002).

Nesta tese, integrada no projecto antes referido, pretende-se desenvolver modelos matemáticos de escoamento, locais e regionais, dos aquíferos em presença. Em particular pretende-se desenvolver um modelo regional, em regime transitório, do principal aquífero do sistema, utilizando as capacidades de discretização espaço-temporal dos fenómenos hidrogeológicos do software Groundwater Modeling System (GMS), baseado no modelo de diferenças finitas Modflow 2000 (McDonald e Harbaugh, 1988, Harbaugh e McDonald, 1996a e 1996b, Hill, 1992, Konikow *et al.*, 1996).

3 OBJECTIVOS

O objectivo central da presente tese consiste na implementação de um modelo regional de fluxo do escoamento subterrâneo do principal aquífero da região, susceptível de ser utilizado no apoio à gestão dos recursos hídricos, superficiais e subterrâneos, da região, exemplificando essa aplicação. Para se alcançar o objectivo central enunciado é necessário simular vários aspectos do escoamento subterrâneo, utilizando diversas técnicas de modelação, envolvendo modelos analíticos, semi-analíticos e de diferenças finitas em diversos locais e a várias escalas, confrontando e discutindo a sua utilidade e aplicabilidade na presente área de estudo, contribuindo para uma problemática mais vasta relativa à modelação matemática do escoamento em aquíferos cársicos.

Numa ocasião em que se pretende implementar a Directiva Comunitária sobre as Águas Subterrâneas (Directiva 2006/118/CE), também é objectivo da presente tese contribuir para o conhecimento da geometria e da dinâmica das massas de água subterrânea desta região e das relações entre estas e as águas de superfície, assim como com os ecossistemas delas dependentes.

Correspondendo às preocupações crescentes da União Europeia no que respeita às alterações climáticas e ao combate à desertificação, pretende-se ainda avaliar os impactes das alterações climáticas nos recursos hídricos subterrâneos desta região, considerada como área piloto dos aquíferos carbonatados do soco Varisco do Alentejo, propondo-se medidas de mitigação desses impactes com base no modelo regional desenvolvido.

4 ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO E INDICADORES ESTATÍSTICOS

CONCELHIOS

A área de estudo situa-se quase exclusivamente na região Alentejo, no sul de Portugal (Figura 4.1). Apenas uma pequena parte terminal da serra de Ficalho, incluída no aquífero Moura-Ficalho, entra já em território espanhol, em direcção a Rosal de la Frontera (Figura 4.2). Está compreendida entre os paralelos 38°12'N e 37°56'N (aproximadamente cerca de quatro quilómetros a norte de Moura até cerca de um quilómetro a sul de Vila Verde de Ficalho) e os meridianos 7°31'W e 7°13'W, que passam a cerca de 4 quilómetros a oeste de Pias e na povoação de Safara, respectivamente.

O sistema aquífero em estudo localiza-se na margem esquerda do Rio Guadiana, maioritariamente, na sub-bacia do Rio Ardila. Estão incluídas a bacia da Ribeira de Brenhas e uma parte da bacia da Ribeira da Toutalga, ambas afluentes da margem esquerda do Ardila.

Do ponto de vista administrativo, são abrangidas parcialmente as freguesias de Vale de Vargo, Vila Nova de S. Bento e Vila Verde de Ficalho, do concelho de Serpa e as freguesias de Sobral da Adiça, São João Batista e Santo Agostinho, no concelho de Moura.

O sistema aquífero Moura-Ficalho é a principal origem de abastecimento público das populações abrangidas, constituindo ainda a principal origem de abastecimento para a agricultura e pecuária e indústria.

Segundo dados do Instituto Nacional de Estatística (Censos de 2001, INE) a população dos concelhos de Moura e de Serpa em 2001 é a que consta da Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – População residente nas freguesias dos concelhos de Moura e Serpa, segundo Censos 2001.

Freguesia do concelho de Moura	População residente	Freguesias do concelho de Serpa	População residente
Amareleja	2763	Aldeia Nova de São Bento	3430
Póvoa de São Miguel	1094	Brinches	1175
Safara	1167	Pias	3036
Moura (Santo Agostinho)	4475	Serpa (Salvador)	4379
Moura (São João Baptista)	4747	Serpa (Santa Maria)	2184
Santo Aleixo da Restauração	842	Vale de Vargo	1073
Santo Amador	456	Vila Verde de Ficalho	1446
Sobral da Adiça	1046	-	-
Total da cidade de Moura	9222	Total da vila de Serpa	6563
Total do concelho de Moura	16590	Total do concelho de Serpa	16723

No que se refere ao abastecimento público existem origens subterrâneas e superficiais. As origens superficiais envolvidas são a captação do rio Ardila, situada a NW de Safara, e a captação da barragem do Enxoé, situada a SE de Pias. Quer uma quer outra têm apresentado problemas de qualidade/quantidade, sendo então o abastecimento assegurado, tal como em outras situações do Alentejo, com recurso às antigas origens subterrâneas.

Segundo o Anuário Estatístico da Região Alentejo (AERA) 2004 (INE, 2004), em 2003 os consumos classificados pelos tipos de usos e os volumes captados nas várias origens são os que constam da Tabela 4.2. Nesta são notórias diferenças significativas entre os volumes captados e os consumos, o que pode ser explicado por subavaliação de alguns consumos e por perdas nas redes de adução e de distribuição.

Tabela 4.2 – Consumos e totais captados para o abastecimento público em 2003, em Moura e Serpa.

Concelhos	Total de consumos (x1000 m3)	Tipo de uso			Total captado (x1000 m3)	Origens			
		Residencial e de serviços	Industrial	Outros		Superficial		Subterrânea	
							%		%
Moura	714	658	41	15	1 752	430	24,5	1 322	75,5
Serpa	522	490	32	-	836	358	42,8	478	57,2

No que respeita às actividades económicas da região classificadas segundo o Código de Actividades Económicas, os dados do AERA 2004, relativos ao ano de 2003 e aos dois concelhos envolvidos, são os que constam da Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Importância económica e social dos sectores de actividade

Actividades económicas	Moura*		Serpa*		Moura**		Serpa**	
	X1000 €	%	X1000 €	%	Empregados	%	Empregados	%
Agricultura, produção animal, caça e silvicultura	3 230	100,0	5 429	100,0	132	100,0	299	100,0
Sector primário	3 230	5,5	5 429	6,7	132	14,3	299	26,4
Indústrias transformadoras	17 631	33,7	12 753	18,6	250	38,3	173	25,3
Construção	2 459	4,7	5 616	8,2	75	11,5	121	17,7
Comércio por grosso e a retalho; oficinas de reparações	32 235	61,6	50 053	73,2	327	50,2	390	57,0
Sector secundário	52 325	89,3	68 422	84,9	652	70,4	684	60,3
Alojamento e restauração (restaurantes e similares)	657	21,8	1 750	25,9	28	19,7	69	45,7
Transportes, armazenagem e comunicações	180	6,0	544	8,0	7	4,9	15	9,9
Actividades imobiliárias, alugueres e serviços prestados às empresas	1 618	53,8	3 555	52,6	58	40,8	38	25,2
Educação, Saúde, acção social e outras actividades de serviços colectivos	554	18,4	908	13,4	49	34,5	29	19,2
Sector terciário	3 010	5,1	6 756	8,4	142	15,3	151	13,3
Total	58 564	100,0	80 607	100,0	926	100,0	1 134	100,0

* - à esquerda x1000 €, à direita %

** - à esquerda n.º de pessoas, à direita %

A agricultura e actividades relacionadas, constituem as únicas actividades do sector primário. A indústria extractiva, apesar de ter sido identificada uma pedreira activa numa zona a norte de Vila

Verde de Ficalho, provavelmente a empresa que a explora não estará sediada na região, pelo que não é incluída nas estatísticas apresentadas. Houve no passado actividade mineira na região, em particular a relacionadas com a extracção de zinco, chumbo e ferro, mas actualmente todas as concessões estão suspensas.

Além da importância económica e social da agricultura e actividades relacionadas, em particular no mercado de trabalho, este sector é o “motor principal” da indústria transformadora. De facto as principais actividades agrícolas da região são o olival, a vinha e a criação de gado. A indústria transformadora mais importante na região é a produção de azeite, vinho, queijo, enchidos e conservas.

O empreendimento de fins múltiplos de Alqueva tem, além da barragem de Alqueva situada imediatamente a norte da presente zona de estudo, diversas outras barragens projectadas, incluindo algumas na presente área de estudo. Com o regadio previsto neste empreendimento deverão, num quadro de racionalização de usos da água na região, ser incluídos alguns dos regadios que actualmente utilizam água do aquífero Moura-Ficalho, devendo esta ser preferencialmente utilizada no consumo humano e na manutenção de ecossistemas dependentes.

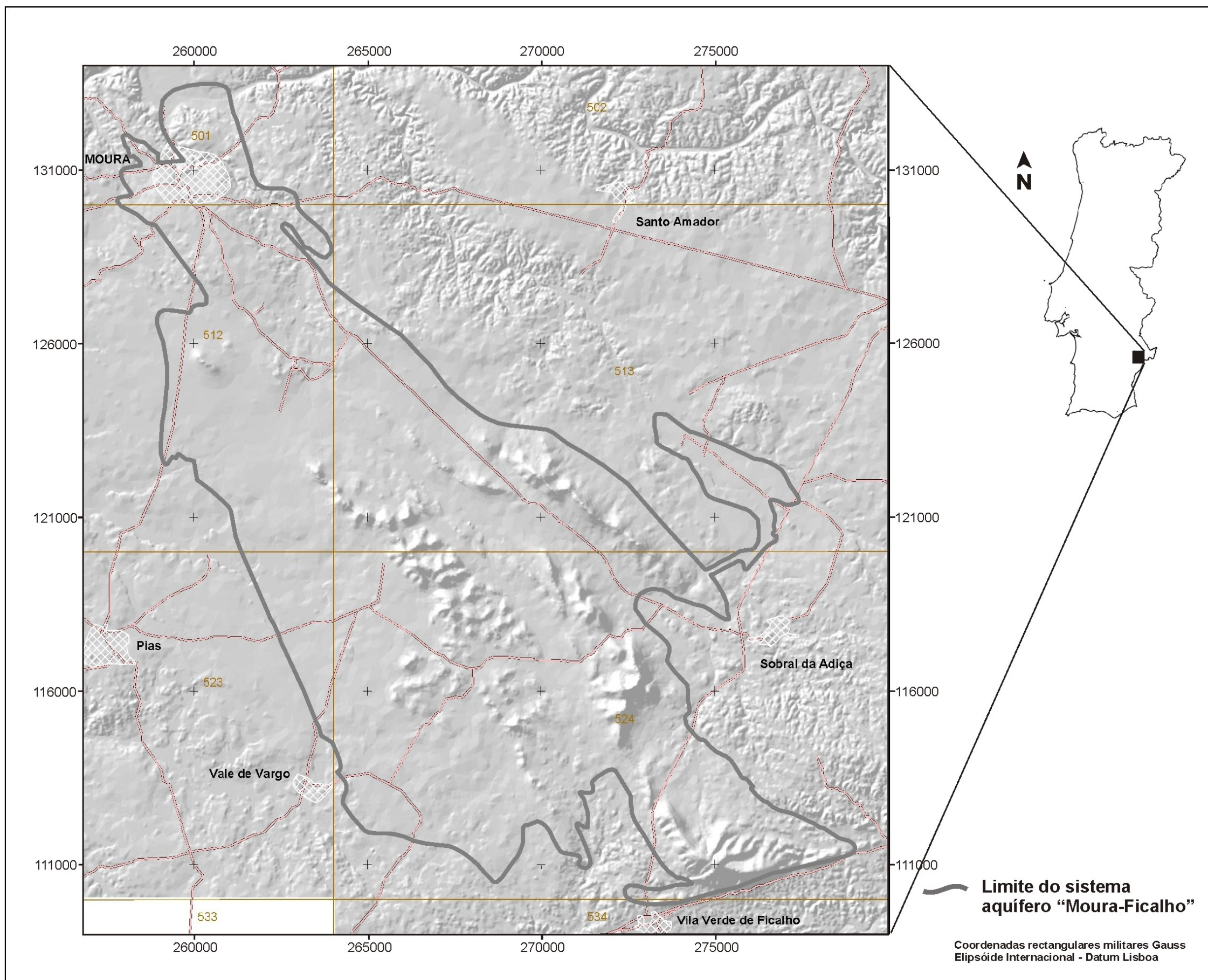
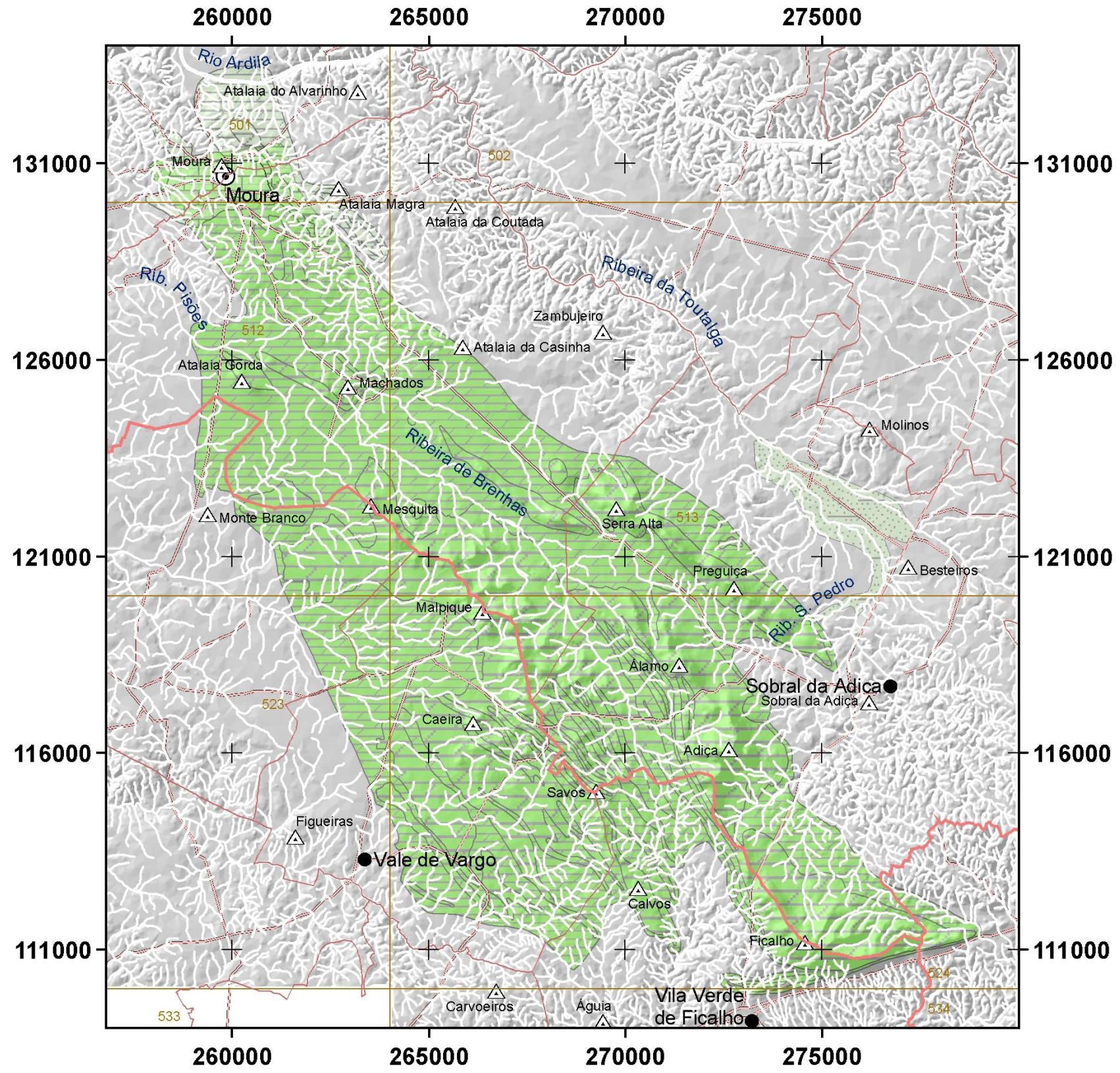


Figura 4.1 – Localização do Sistema Aquífero Moura-Ficalho.



Legenda

- ⊙ Sede de concelho
- Aglomerado populacional
- ▭ Limite de concelho
- ▭ Limite de freguesia
- △ Vertices geodésicos
- ▬ Hidrografia
- Rede viária

Sistema Aquífero de Moura-Ficalho

- Calcários de Moura**
- ▭ Calcários de Moura
- Moura - Brenhas**
- ▭ Aquífero confinado
- ▭ Aquífero livre
- Moura - Ficalho**
- ▭ Aquífero confinado
- ▭ Aquífero livre
- Ribeira da Toutalga**
- ▭ Ribeira da Toutalga

Coordenadas rectangulares militares Gauss
Elipsóide internacional - Datum Lisboa

Figura 4.2- Enquadramento geográfico e administrativo dos principais aquíferos da região.

5 ENQUADRAMENTO GEOMORFOLÓGICO, ESTRUTURAL E TECTÓNICO

Como se evidencia na Figura 5.1, em que se representa o modelo digital do terreno com uma sobrelevação de 10x, a região é dominada pela existência de três alinhamentos de relevo principais que se desenvolvem com direcções próximas de SE-NW, entre Sobral da Adiça e Moura, Vila Verde de Ficalho e Moura e Vale de Vargo e Moura. Trata-se, por isso, de um conjunto de relevos alongados e ligeiramente convergentes em direcção à zona entre Moura e Pisões, organizado da seguinte forma:

- alinhamento ocidental, o mais extenso, é definido por Calvos (316 m), Savos (352 m), Malpique (376 m) e Atalaia Gorda (276 m);
- alinhamento central, o mais vigoroso, é definido por Ficalho (522 m), Adiça (476 m) e Álamo (425 m), continuando-se por uma série de relevos menores, de que fazem parte a Abelheira e Machados;
- alinhamento oriental é constituído pela serra da Preguiça (369 m) e serra Alta (401 m).

Os relevos alinhados e alongados que sobressaem na peneplanície alentejana correspondem a relevos de dureza (Feio, 1951), resultantes do contraste entre as rochas dolomíticas e siliciosas, mais resistentes à erosão, e as rochas xistosas e os mármorees do soco hercínico. A forma dos relevos resulta das próprias estruturas geológicas presentes (anticlinórios com direcção predominante NW-SE).

Revelam-se ainda pela análise geomorfológica, blocos abatidos por condicionantes tectónicas, como o graben que condiciona o troço terminal do Rio Ardila, junto à sua confluência com o Rio Guadiana. Em particular a falha que limita esta estrutura a norte (falha da Vidigueira) é muito evidente na Figura 5.1. Muito embora não se evidencie com tanta clareza, existe um sistema de falhas paralelo a esta, a sul do rio Ardila, dominado pela designada “falha do castelo” que, como o nome sugere, passa junto ao topo norte do castelo de Moura, devendo prolongar-se em direcção à capela de Santo António. Todo este sistema deixa de ser evidente para leste, onde não existe um substrato dolomítico a poucas dezenas de metros de profundidade, capaz de preservar algumas das escarpas de falha, como sucede na zona norte de Moura. Também se revelam na análise geomorfológica alguns desfasamentos no alinhamento de relevos, como o que separa a Serra da Preguiça e a Serra Alta e a própria separação entre relevos alinhados, como se observa entre Malpique e Atalaia Gorda, Calvos e Savos, etc. Quaisquer das situações referidas devem relacionar-se com uma actividade tectónica transversal à direcção hercínica, com movimentações de desligamento esquerdo e movimentações verticais, como é referido no capítulo da Geologia.

Ainda merecem referência algumas formas cársicas que se encontram na região. Foram identificados diversos algares, essencialmente de abatimento, no topo e na encosta NE da serra de Ficalho. Também na encosta NE da serra da Adiça foi identificada uma sala, com a designação popular de "Cova da Adiça". Esta parece prolongar-se através de uma galeria que se encontra

obstruída. Outros algares, mais ou menos obstruídos foram identificados numa área a sul da serra da Abelheira e a oeste da serra Alta. Nesta zona define-se uma depressão com drenagem endorreica, com uma cobertura de cascalheiras quaternárias, na qual se situa o algar antes referido e em cuja zona central mais deprimida se deve situar outro algar completamente obstruído pelas cascalheiras e material argiloso arrastado. Neste local forma-se um lago temporário durante os episódios chuvosos mais intensos, que desaparece um ou dois dias após as chuvadas. Pensa-se que a origem desta estrutura cársica deve relacionar-se com a falha NE-SW, que corta o alinhamento de relevos Preguiça-Serra Alta, como foi referido anteriormente, configurando o que poderá designar-se pelo "polje da Abelheira". A NW deste local, em direcção a Machados, encontra-se ainda um alinhamento de depressões na direcção SE-NW no qual se fizeram trabalhos de prospecção magnética e electromagnética. A interpretação dos resultados obtidos permitiu identificar formas cársicas fossilizadas pela cobertura terciária a pequena profundidade (Sporry *et al*, 1997).

Ao longo da Ribeira de Brenhas foram identificadas zonas de sumidouros e troços em que se formam pequenas lagoas mais ou menos efémeras, após episódios chuvosos intensos.

Também na serra da Preguiça foram reconhecidas algumas formas cársicas, nomeadamente a chamada "gruta das Pedras Bonitas". Trata-se, neste caso, de várias salas e galerias, que foram intersectadas pelos trabalhos mineiros da concessão designada "Preguiça", encontrando-se, por isso, completamente vandalizada. Apesar deste estado, pode constatar-se a existência de precipitações de calcite e aragonite, com formas muito belas, o que justifica a designação popular desta gruta, onde se assinala igualmente a existência de morcegos testemunhada por grandes acumulações de fezes destes animais.

Foram ainda os trabalhos mineiros nesta zona (concessão de Vila Ruiva, contígua à da Preguiça, antes referida), neste caso a céu aberto, que vieram pôr a descoberto um conjunto impressionante do que devem ser formas cársicas de grande dimensão. O material de preenchimento das enormes aberturas, essencialmente constituído por óxidos e hidróxidos de ferro, zinco, chumbo e manganês, foi extraído como minério de zinco, descarnando desta forma o esqueleto cársico constituído principalmente por dolomitos. As características de textura, composição mineralógica e geoquímica destes preenchimentos foram detalhadamente descritas por Quental (1995), onde se refere que as ocorrências mineiras de Vila Ruiva e da Preguiça correspondem a chapéus de ferro, formados a partir de um jazigo de sulfuretos (blenda, com alguma galena, pirite e calcopirite) detectado em profundidade na Preguiça. Admite-se neste relatório, citando Goinhas (1971), que a formação dos depósitos de óxidos e hidróxidos de Vila Ruiva terá ocorrido durante o Terciário.

A interpretação apresentada sugere que em Vila Ruiva teria havido um carso muito desenvolvido, com enormes aberturas essencialmente orientadas na direcção NW-SE, que foram posteriormente

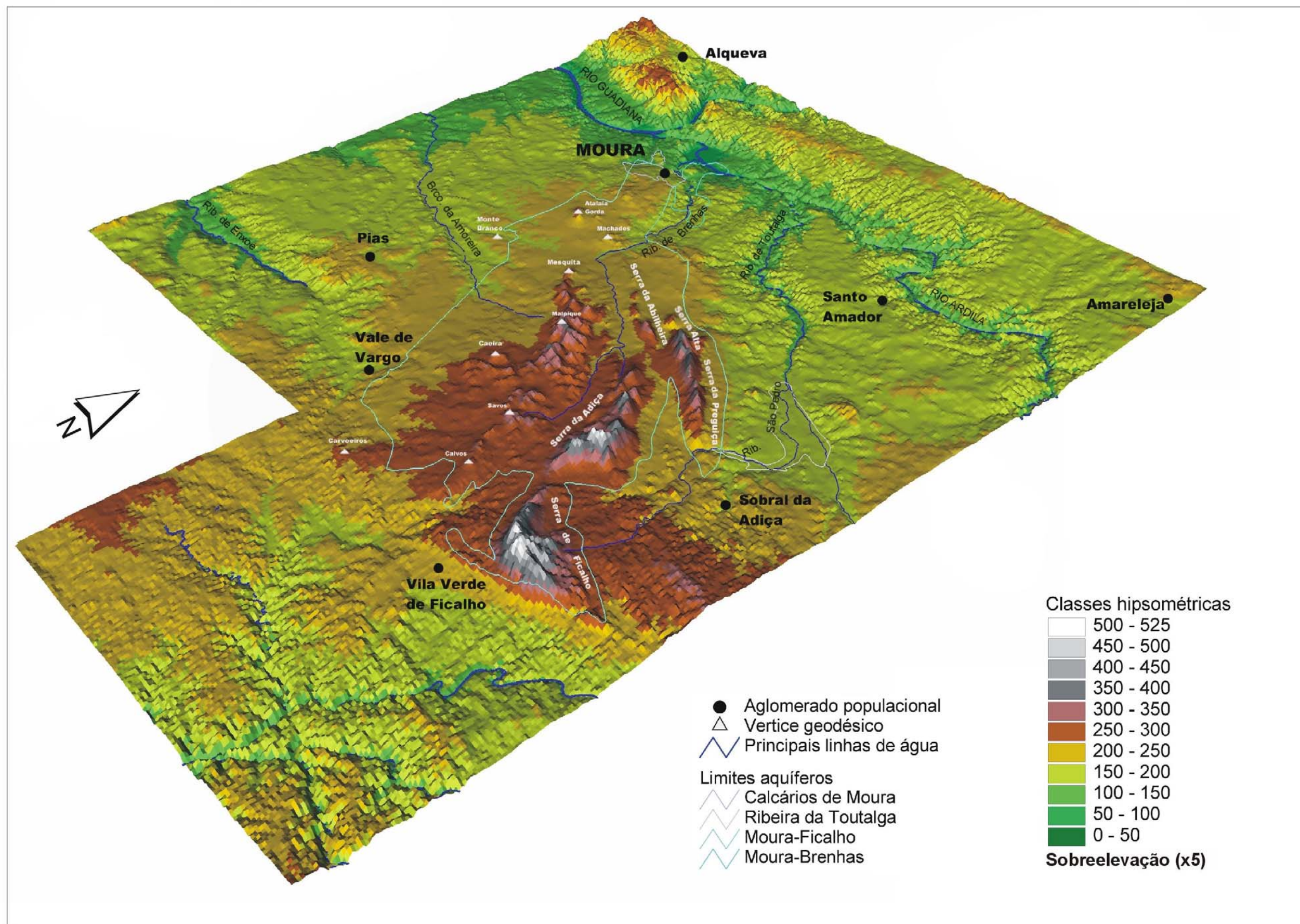


Figura 5.1 - Modelo digital do terreno (sobreelevação de 10x,) com indicação dos contornos dos principais aquíferos da região.

preenchidas pelas formações de óxidos e hidróxidos. Tratar-se-á, por isso, de um paleocarro terciário fossilizado. O processo de preenchimento das cavidades contudo não fica muito claro. De facto, muito embora se tenham procurado quaisquer indícios de estratificação ou outras figuras sedimentares que pudessem confirmar a natureza sedimentar dessas formações, nada foi encontrado. Parece indispensável a contribuição de uma equipa multidisciplinar de especialistas, envolvendo a sedimentologia, geocronologia e espeleologia, no sentido de esclarecer esta questão e de datar estes fenómenos, contribuindo para a caracterização das várias fases de carsificação que afectaram esta região.

A sudeste de Moura, no local designado por Fábrica do Visconde também há indícios de um possível paleocarro fossilizado.

ÍNDICE do Capítulo 1 a 5

1	INTRODUÇÃO E ESTRUTURA DA TESE	1
2	ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS ANTERIORES.....	5
3	OBJECTIVOS	7
4	ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO E INDICADORES ESTATÍSTICOS CONCELHIOS..	9
5	ENQUADRAMENTO GEOMORFOLÓGICO, ESTRUTURAL E TECTÓNICO.....	15

Índice de Figuras Capítulo 1 a 5

Figura 1.1 - Sistemas aquíferos cársicos do socal varisco do Alentejo.....	1
Figura 4.1 – Localização do Sistema Aquífero Moura-Ficalho.	13
Figura 4.2– Enquadramento geográfico e administrativo dos principais aquíferos da região.	14
Figura 5.1 - Modelo digital do terreno (sobreelevação de 10x,) com indicação dos contornos dos principais aquíferos da região.	17

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 – População residente nas freguesias dos concelhos de Moura e Serpa, segundo Censos 2001.	9
Tabela 4.2 – Consumos e totais captados para o abastecimento público em 2003, em Moura e Serpa.	10
Tabela 4.3 – Importância económica e social dos sectores de actividade	10

6 GEOLOGIA

A carta geológica (Figura 6.1) utilizada neste trabalho foi preparada em formato digital com base nos levantamentos de Carvalhosa (1965), nas escalas 1/25.000 e 1/50.000. Localmente foram ainda utilizados levantamentos e cortes geológicos a escalas de pormenor, nomeadamente diversas folhas na escala 1/5.000 do antigo Serviço de Fomento Mineiro (SFM) de Beja, da autoria de Victor de Oliveira. A classificação litoestratigráfica adoptada consiste essencialmente na que foi adoptada na folha 8 da Carta Geológica de Portugal na escala 1/200.000, de acordo com a sugestão de V. Oliveira, que também colaborou com outra informação oral muito variada.

Neste capítulo é utilizado muito do trabalho de síntese preparado por toda a equipa do então IGM, para o capítulo da Geologia do Relatório Final do Projecto ERHSA (2001).

A zona de estudo abrange formações do soco *varisco* com intrusões magmáticas pós e tardi hercínicas, parcialmente cobertas por depósitos do Terciário e Holocénico.

6.1 Soco *varisco*

A região faz parte do segmento ibérico da cadeia hercínica e abrange essencialmente a extremidade meridional da unidade geotectónica designada por Zona de Ossa Morena (ZOM). Na carta geológica apresentada na Figura 6.1 representa-se ainda uma estreita faixa da chamada formação de Santa Iria, a qual já faz parte da zona geotectónica designada por Zona Sul Portuguesa (ZSP). A separação entre a ZOM e a ZSP é feita através do cavalgamento de Ferreira-Ficalho.

A ZOM é caracterizada por uma acentuada heterogeneidade paleogeográfica, metamórfica e tectónica. A definição e caracterização dos domínios e subdomínios desta zona têm sido objecto de contributos de vários autores (Chacón *et al*, 1983; Araújo, 1989; Apalategui *et al*, 1990; Oliveira *et al*, 1991; Oliveira *et al*, 1992; Araújo e Ribeiro, 1995 *in* Araújo, 1995). A observação da Figura 6.2, onde se representam as divisões tectono-estratigráficas da ZOM, permite concluir que a presente área de estudo faz parte, essencialmente, do sector Montemor-Ficalho. Apenas pequenas áreas a NE e a SW estão fora deste sector, pertencendo respectivamente aos sectores Estremoz-Barrancos e Maciço de Beja. Ainda segundo os mesmos autores, a sequência litoestratigráfica simplificada que se aplica a este sector e em particular ao antiforma Moura-Ficalho, que constitui a maior parte da presente zona de estudo, é representada na Figura 6.3. A sequência litoestratigráfica abrange idades que vão desde o precâmbrico (Série Negra) até ao Silúrico (Formação dos Xistos de Moura).

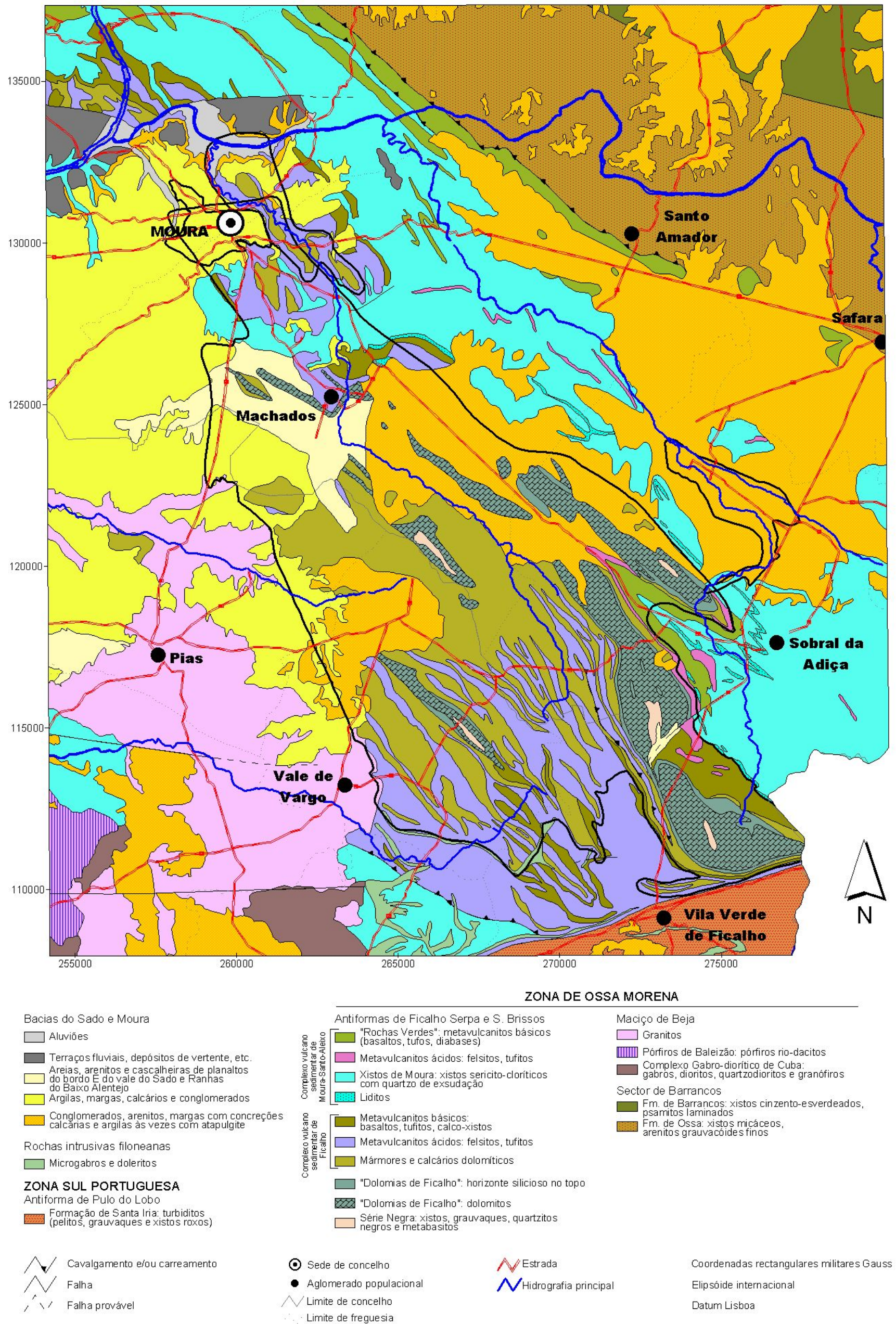


Figura 6.1 - Mapa geológico da região, com indicação dos contornos do Sistema Aquífero Moura-Ficalho.

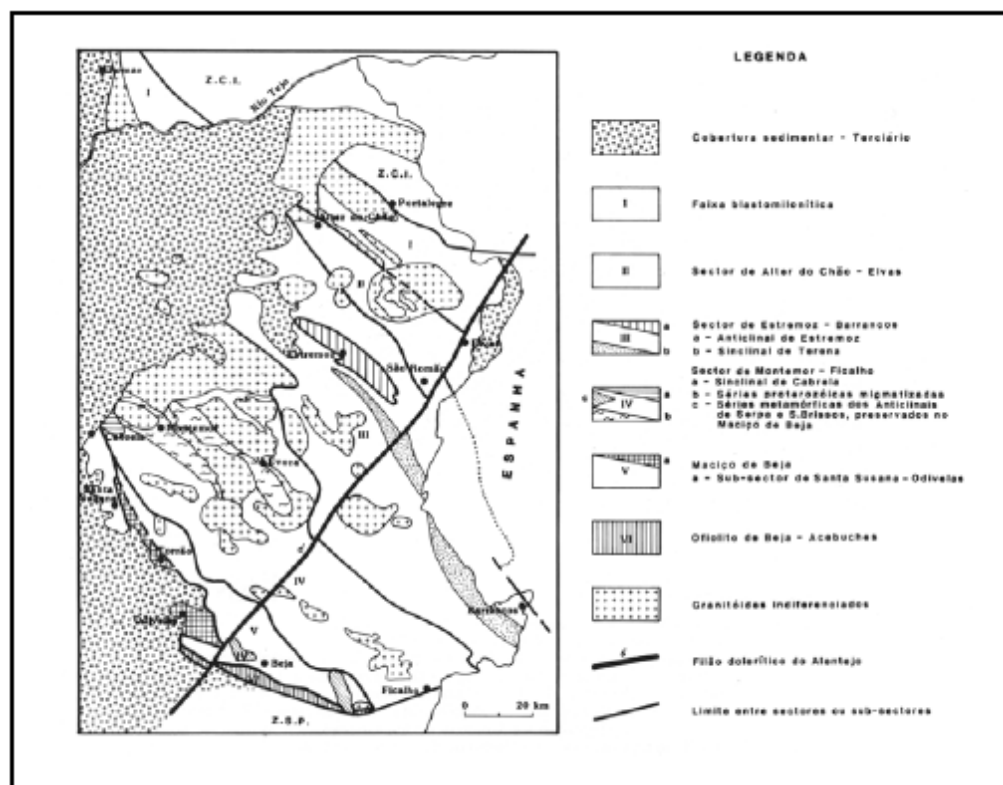


Figura 6.2 - Divisões tectono – estratigráficas da Zona de Ossa Morena, em Portugal (Oliveira *et al*, 1991)

6.1.1 Série Negra

O soco proterozóico pouco metamórfico é constituído por xistos negros, chertes e metagrauvaques. Constitui na região os núcleos de várias dobras anticlinais, ocupando faixas no topo de algumas das serras da região. A sequência da “Série Negra” tem semelhanças litológicas e estratigráficas com a que ocorre na Faixa Blastomilonítica do NE Alentejano e também com a do núcleo do Anticlinal de Estremoz (Formação de Mares).

Na sondagem SD3Bicas1, realizada no interior do castelo de Moura, a Série Negra foi intersectada a uma profundidade de 690 m.

6.1.2 Formação Dolomítica

A base desta formação é constituída por conglomerados, arcoses e vulcanitos ácidos aflorando nas regiões de Ficalho, Moura e Serpa. Ao episódio vulcânico sucedem-se calcários dolomíticos com 400 m de espessura com intercalações siliciosas chérticas e níveis brechóides interpretados como acidentes tectónicos ou preenchimentos cársicos (Piçarra *et al*, 1992).

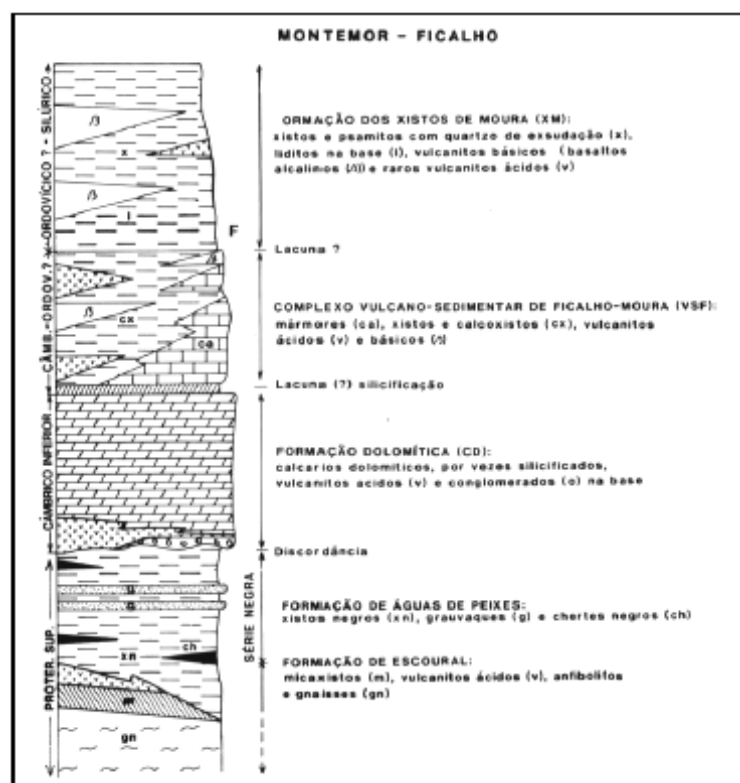


Figura 6.3 - Sequência estratigráfica simplificada do Sector de Montemor-Ficalho (Oliveira *et al*, 1991)

A *formação dolomítica* é atribuída ao Câmbrio inferior, por correlação com a região de Elvas (Oliveira e Piçarra, 1986) e assenta em discordância sobre o soco proterozóico.

Tal como sucede no NE Alentejano, também nesta zona ocorre um horizonte silicioso sobre os dolomitos, com espessura que varia entre os 0 - 10 m. Este horizonte é interpretado, tal como em Estremoz, como testemunho de uma lacuna erosiva, responsável pela ausência de Câmbrio médio e superior na região e pela carsificação do topo da Formação Dolomítica (Ribeiro *et al*, 1992; Oliveira e Piçarra, 1986). Em Moura este horizonte poderá ser equivalente a um nível conglomerático brechóide, com rara sílica associada, intersectado em sondagem (Piçarra *et al*, 1992 *in* Araújo, 1995). A interpretação estratigráfica do "horizonte silico-ferruginoso" não é consensual, aconselhando-se a consulta do trabalho de Piçarra e Sarmiento (2006) sobre esta problemática.

A formação dolomítica constitui a generalidade dos relevos alinhados na direcção geral NW-SE, como foi referido no enquadramento geomorfológico, estrutural e tectónico.

6.1.3 Complexo vulcano-sedimentar Ficalho-Moura

Sobre o horizonte silicioso ocorre o Complexo Vulcano Sedimentar Carbonatado, muito semelhante ao que aflora no Anticlinal de Estremoz (Oliveira e Piçarra, 1986).

Corresponde a uma sequência bimodal, depositada em meio marinho como o testemunha a ocorrência de lavas em almofada, observáveis na margem direita do Guadiana, no local da Barragem de Alqueva. Este complexo encontra-se representado por metavulcanitos ácidos e básicos, aos quais se associam sedimentos carbonatados. Apresenta todo um conjunto de litologias, desde os termos vulcânicos próximos até às rochas sedimentares, representadas maioritariamente por mármore com passagens laterais a calcários dolomíticos do tipo "Olho de Mocho" (dolomitos secundários com alvéolos resultantes da própria dolomitização), passando por termos vulcânicos distais. Nestes ocorrem níveis de tufos (desde tufos brecha até tufos finos), tufitos por vezes "borra de vinho", xistos, calcoxistos, metachertes e esporadicamente liditos. Estes vulcanitos são mal conhecidos, e, segundo Ribeiro *et al* (1992), os dados petrográficos e geoquímicos deste complexo apontam para uma sequência do tipo intraplaca, com toleitos continentais. Sem qualquer informação bioestratigráfica ou geocronológica, torna-se difícil atribuir uma idade a este complexo. Os trabalhos mais recentes consideram que o Complexo Vulcano-Sedimentar de Moura-Ficalho terá uma idade compreendida entre o Câmbrio superior e o Ordovícico (Oliveira, 1984; Oliveira *et al*, 1991; Oliveira e Matos, 1992; Piçarra *et al*, 1992).

Segundo Araújo (1995), todas as tentativas para estabelecer uma estratigrafia interna neste complexo, ou para fazer correlações litoestratigráficas mais finas, entre as regiões de Moura e de Ficalho (Carvalhosa, 1983; Araújo, 1989; Oliveira *et al*, 1991; Oliveira e Matos, 1992; Piçarra *et al*, 1992), são bastante arriscadas e falíveis à luz dos novos dados recolhidos. Com efeito, no sector estudado por Araújo (1995), os contactos entre os vários litótipos deste complexo, são regra geral mecânicos e a estrutura Moura Ficalho não corresponde a um anticlinal simples mas sim a uma estrutura do tipo "antiformal stack", gerada em regime de deformação tangencial progressiva. A este propósito refira-se o trabalho de Oliveira e Matos (1992), que embora não seja no âmbito da Geologia Estrutural, refere a existência de seis carreamentos intersectados em menos de 300 m de sondagem, na região de Enfermarias Santo André, situada no flanco NE da estrutura de Moura. A própria idade globalmente atribuída ao complexo, Câmbrio superior a Ordovícico, parece incorrecta, uma vez que o estilo tectónico presente permite a imbricação de unidades com idades muito diferentes. A comprovar este facto ocorrem no sector cartografado por Araújo (1989), numa posição geometricamente baixa deste complexo, níveis de líditos semelhantes aos atribuídos ao Silúrico, presentes no Complexo de Moura, geometricamente supra jacente. Independentemente das dificuldades de correlação litoestratigráfica, o estudo feito quanto ao escoamento subterrâneo da zona, aponta no sentido de haver alguma continuidade das fácies carbonatadas desta formação entre a zona dos principais relevos como Adiça, Calvos, Savos, etc. e a zona de Moura, uma vez que o escoamento subterrâneo se faz desde uma zona até à outra. Apesar da baixa permeabilidade característica das rochas vulcânicas, note-se que foram identificados em sondagens alguns níveis

aquíferos em formações de natureza vulcânica, relacionados com zonas de fracturação.

A maior parte das áreas deprimidas situadas entre os relevos alinhados são constituídas essencialmente por mármore e calcários dolomíticos, com algumas intercalações lenticulares de vulcanitos, que pertencem a esta formação. Constituem essencialmente estruturas sinclínicas, intensamente fracturadas e carsificadas, por vezes parcialmente cobertas por depósitos terciários, como foi referido no capítulo sobre o enquadramento geomorfológico, estrutural e tectónico.

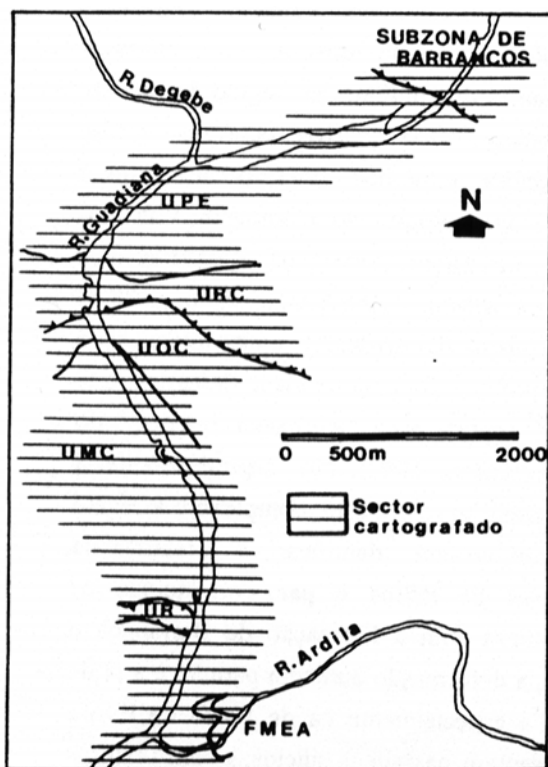
6.1.4 Complexo Vulcano-Sedimentar de Moura - Santo Aleixo (Formação de Xistos de Moura)

A designação de Complexo Vulcano-Sedimentar de Moura - Santo Aleixo foi proposta por Piçarra *et al* (1992) no entanto esta formação é mais vulgarmente conhecida na bibliografia por Formação de Xistos de Moura (por ex. Oliveira e Piçarra, 1986; Carvalhosa *et al*, 1987; Carvalhosa e Zbyszewski, 1991; Oliveira *et al*, 1991, Oliveira *et al*, 1992; etc.). Mais recentemente Araújo (1993), propôs a designação de Complexo Filonítico de Moura.

A idade deste complexo tem-se mostrado bastante polémica dada a ausência de informação bioestratigráfica, no entanto nos últimos anos tem sido atribuída sobretudo ao Câmbrio (Carvalhosa, 1983) e ao Silúrico (Carvalho *et al*, 1971; Oliveira e Piçarra, 1986). O complexo é constituído maioritariamente por xistos luzentes, siliciosos a sericito-cloríticos, com abundante quartzo de exsudação. Nos níveis geometricamente mais baixos, próximo do contacto com o Complexo Vulcano Sedimentar de Moura-Ficalho, ocorre um nível de líditos e xistos negros com poucos metros de espessura, com razoável continuidade nas estruturas de Ficalho e Adiça e muito descontínuo na região de Moura.

Em posições geometricamente mais elevadas, intercalados nos xistos, ocorrem outros níveis de líditos e xistos negros, metavulcanitos ácidos e básicos e mesmo calcoxistos e mármore correspondentes a repetições tectónicas de litologias do Complexo Vulcano-Sedimentar subjacente. Na região NE, próximo de Santo Aleixo da Restauração, a deformação é menor, o quartzo de exsudação é menos abundante, sendo possível reconhecer passagens psamítico-grauvacóides nos xistos. Neste sector, numa intercalação de líditos e xistos negros, foram encontrados graptólitos da parte superior do Llandovery, que representam a única referência cronoestratigráfica segura para o Paleozóico inferior do Domínio de Évora e Beja (Piçarra e Gutierrez-Marco, 1992). No seguimento desta descoberta, Piçarra *et al* (1992) propõem um paralelismo entre este complexo e a região envolvente de Estremoz, tendo desenvolvido esforços para identificar a presença da Formação de Colorada associada à base dos níveis de líditos e para correlacionar os níveis xistentos do Complexo Vulcano-Sedimentar de Moura-Santo Aleixo com a Formação de Barrancos e eventualmente com a Formação de Ossa. Contudo, a deformação aumenta para W e a N de Moura,

nas unidades de Outeiro dos Castelos e especialmente na de Porto de Évora (Araújo, 1989 *in* Araújo, 1995; Figura 6.4), os xistos apresentam passagens siliciosas com texturas miloníticas muito frequentes.



Legenda:

- UPE – Unidade de Porto de Évora;
- URC – Unidade da Ribeira de Codes,
- UOC – Unidade do Outeiro dos Castelos;
- UMC – Unidade de Moinho do Carneiro;
- UR – Unidade da Ramada;
- FMEA – Formação de Monte Entre Águas

Figura 6.4 - Unidades definidas no troço do Sector do Anticlinal de Moura – Ficalho, coberto pela geotransversal do rio Guadiana (adaptado de Araújo, 1989 *in* Araújo, 1995)

Neste sector não se reconhecem os termos detríticos intercalados nos xistos, observáveis na região de Santo Aleixo, sendo frequentes as intercalações de tufos e metavulcanitos, geralmente de composição básica, com espessuras variáveis desde a escala decamétrica até alguns metros, regra geral separados dos xistos por acidentes tectónicos. O facto de ocorrerem imbricados neste complexo litótipos de várias naturezas, pertencentes a unidades enquadrantes, torna desprovida de sentido a atribuição de qualquer idade ao conjunto. Um aspecto relevante para a interpretação deste complexo como um empilhamento de mantos é a ocorrência de crossite em metavulcanitos básicos de Unidade da Ribeira de Codes (Figura 6.4), imbricada no conjunto e referida anteriormente, a propósito do Complexo Vulcano Sedimentar de Moura Ficalho.

Como foi anteriormente referido, a zona NE da carta geológica apresentada (Figura 6.1), inclui duas formações já pertencentes ao sector Estremoz-Barrancos, que são descritas nos itens seguintes.

6.1.5 Formação de Ossa

A Formação de Ossa, considerada a mais antiga do sector Estremoz-Barrancos, é constituída por xistos e psamitos, tornando-se mais rica em grauvaques para NW (Carvalhosa *et al*, 1987; Oliveira *et al*, 1991). É paralelizada à Formação de Fatuquedo pelas suas semelhanças de fácies e por passar superiormente à Formação de Barrancos, aparentemente em concordância. A Formação de Fatuquedo não apresenta fósseis em território português, por correlação com formação semelhante em Espanha (Mette, 1989), admite-se actualmente que a Formação de Ossa possa ser também do Câmbrico médio, atingindo eventualmente o Câmbrico superior (Piçarra e Gutierrez - Marco, 1992).

A base desta formação encontra-se marcada por uma extensa faixa de vulcanitos básicos que ocorrem desde a fronteira até à falha da Messejana, perto de Monte do Trigo, passando por Santo Aleixo da Restauração, Safara e Amieira. Ocorrem predominantemente tufos finos a grosseiros e rochas espilíticas (Piçarra *et al*, 1992), sendo de referir a ocorrência de "pillow lavas" no Vale do Guadiana (Araújo, 1989).

Alguns estudos petrográficos e geoquímicos preliminares apontam para que estas rochas sejam de natureza alcalina, sugerindo vulcanismo intraplaca (Carvalho, 1987; Ribeiro *et al*, 1992). Embora no Vale do Guadiana o contacto destes metavulcanitos com os xistos a NE se faça por falha, noutros locais (estrada Moura-Póvoa de São Miguel, Vale do Rio Ardila e região de Santo Aleixo da Restauração) observam-se xistos "borra de vinho" e níveis de cherte na passagem à Formação de Ossa, apontando para um contacto estratigráfico entre estas formações (Araújo, 1989 *in* Araújo, 1995).

6.1.6 Formação de Barrancos

Sob esta designação incluem-se os membros dos "Xistos de Barrancos" e dos "Xistos com Phyllocytes" definidos por Nery Delgado em 1908. Na Carta Geológica de Portugal, à escala 1:200 000, folha 8 e respectiva notícia explicativa, estes dois membros são, contudo, tratados como formações independentes. A Formação do Meirinho definida por Araújo (1989) é considerada equivalente à dos "Xistos de Barrancos". Esta é constituída por xistos de tonalidade roxa-violeta, finos, micáceos, com intercalações métricas de xistos cinzento-esverdeados e raras passagens de psamitos finamente laminados. Esta formação, com espessura provável de algumas centenas de metros, não forneceu, até ao momento, fósseis com interesse estratigráfico, sendo considerada do Câmbrico superior ou Ordovícico inferior, por passar gradualmente, na região de Barrancos, aos "Xistos com Phyllocytes" suprajacentes (Perdigão *et al*, 1982; Piçarra e Gutierrez - Marco, 1992). Foi referido anteriormente que a zona sudeste da carta geológica apresentada incluía uma faixa da formação de Santa Iria, pertencente à ZSP. No item seguinte faz-se a descrição sucinta dessa formação.

6.1.7 Formação de Santa Iria (D_{SI})

A *Formação de Santa Iria* (D_{SI}) faz parte do flanco N do Antiforma do Pulo do Lobo, uma das zonas paleogeográficas ou domínios da ZSP (Oliveira *et al*, 1990). As formações deste flanco norte também têm sido designadas por Grupo de Ferreira-Ficalho (Carvalho *et al*, 1976), com idade atribuída ao Devónico médio a Fameniano médio.

Trata-se de uma formação flyschóide de natureza turbidítica, constituída por alternância de pelitos, siltitos e grauvaques, estes em geral em bancadas de possança submétrica. Nas proximidades da falha de Ferreira-Ficalho observa-se algum enriquecimento em sílica que se deve relacionar com a própria actividade tectónica.

6.2 Terciário e Holocénico

No Alentejo as formações terciárias e quaternárias tiveram origem em diferentes domínios tectono-sedimentares, cuja evolução foi condicionada por factores de natureza paleogeográfica e estrutural. O grau de pormenor dos trabalhos sobre o terciário do Alentejo, também é diferenciado conforme as áreas e não foi feita, ainda, uma correlação geral de todas as designações litoestratigráficas.

Assim foi adoptada uma legenda da cartografia apresentada que se baseia na Carta Geológica de Portugal na escala 1:200.000 (Oliveira *et al*, 1992), referindo-se depois, em capítulo distinto, uma interpretação mais recente relativa ao domínio da bacia de Moura-Marmelar, onde já foram definidos novos termos litoestratigráficos.

6.2.1 Conglomerados, arenitos, margas com concreções calcárias e argilas, às vezes, com atapulgite

Corresponderá ao chamado “Complexo de Marmelar” (Carvalhosa e Carvalho, 1970), constituído por um nível superior detrítico, com espessura inferior a 20 m, de cor avermelhada e com algumas intercalações conglomeráticas e por um nível inferior carbonatado, esbranquiçado, passando lateralmente a níveis de argilitos brancos e amarelados muito compactos. Alguns pequenos afloramentos são constituídos apenas pelo nível carbonatado.

Os calcários são compactos, mais ou menos dolomíticos, levemente gresosos, pouco margosos, brancos ou rosados e a sua espessura máxima é inferior a 20 m.

Existem semelhanças entre os calcários do Paleogénico e os calcários miocénicos de Moura. Por sua vez os depósitos detríticos superiores apresentam semelhanças com os níveis detríticos inferiores do Miocénico.

Com base na semelhança litológica e na predominância generalizada da atapulgite na fracção argilosa, é atribuída idade paleogénica a esta formação (Carvalho e Alves, 1970).

6.2.2 Argilas, margas, calcários e conglomerados

Trata-se de depósitos continentais que assentam directamente sobre o soco hercínico ou sobre as formações atribuídas ao Paleogénico. Segundo os autores da folha 43-B (Moura) da Carta Geológica na escala 1/50.000 (Carvalhosa e Carvalho, 1970), o Miocénico continental desta região é constituído, de baixo para cima, pelos três conjuntos litológicos que se designam por: “Arenitos de Moura”, “Depósitos detríticos grosseiros” e “Calcários de Moura”. Todo o conjunto inclina ligeiramente para oeste.

Os arenitos da base, de origem fluvial, são em geral argilo-margosos, de grão fino, de cor esverdeada, acastanhada, amarelada ou esbranquiçada com lentículas argilosas, assentando sobre o Paleogénico e com espessura máxima da ordem de 30 m. Os mesmos autores assinalam a ocorrência de formações calcárias com seixos rolados na base dos grés, a sul de Moura, nos arredores de Pias e Vila Nova de S. Bento entre outros locais. Refere-se ainda o facto de estas camadas serem recortadas por falhas que originam localmente pendores da ordem de 30° nestas camadas.

Sobre os arenitos anteriores assentam arenitos argilosos mais grosseiros com lentículas conglomeráticas e cores castanho-avermelhadas devido a impregnações ferruginosas. A fracção detrítica mais grosseira é essencialmente constituída por calhaus de quartzo pouco rolados e de pequena dimensão e no cimento argiloso predominam a montemorilonite, ilite e caulinite.

Os calcários de que ocupam o topo da sequência miocénica ocupam uma vasta área nos arredores de Moura e são esbranquiçados, mais ou menos compactos, pouco gresosos, às vezes, pulverulentos e com aspecto margoso.

6.2.3 Ranhas do Baixo Alentejo

Os depósitos de idade plio-pleistocénica estão representados por formações do tipo ranha, depositadas em clima árido, no Vilafranquiano (Ribeiro e Feio, 1950). Trata-se depósitos de cascalheiras com elementos angulosos de quartzo e calhaus mais ou menos rolados de cimentados por matriz arenosa e argilo-ferruginosa, às vezes, com forte rubefacção.

As ranhas anteriormente referidas tiveram origem na serra de Portel e na movimentação da falha da Vidigueira e de outros acidentes associados, situando-se os principais afloramentos na zona de Marmelar.

Na presente área de estudo a principal mancha desta formação situa-se numa área a sul de Moura, de onde sobressaem os relevos de dureza constituídos pelas colinas Atalaia Gorda, Cerro das Canas, Baleato e Mesquita. A origem destes depósitos deve relacionar-se com dois processos: por um lado a desagregação dos relevos de dolomitos e rochas siliciosas, que deu origem à fracção clástica angulosa e por outro a fracção argilosa, dominante na matriz areno-argilosa, que deve

resultar essencialmente de processos de acumulação de terra rossa, relacionados com a carsificação dos mármore e calcários dolomíticos subjacentes.

Além da mancha principal, em diversos locais da bacia hidrográfica da Ribeira de Brenhas, a montante desta zona, são evidentes os indícios de acumulação de cascalheiras soltas e da acumulação de argila residual nas zonas deprimidas entre os relevos alinhados. Em particular, entre os relevos Abelheira e Malpique, foram identificados alguns sumidouros cujo funcionamento na drenagem do escoamento superficial se relaciona com os depósitos detríticos que aí se observam.

6.2.4 Terraços fluviais

Os vários terraços fluviais que se encontram nas margens dos rios Guadiana e Ardila são constituídos por calhaus rolados e blocos de quartzito, quartzo e metalidito, constituindo lentículas numa matriz areno-argilosa.

Segundo a notícia explicativa da folha 43-B (Moura) da Carta Geológica na escala 1/50.000 (Carvalhosa e Carvalho, 1970), os terraços encontram-se escalonados em quatro níveis, desde 80-90 metros acima do rio até 12-15 metros acima do rio. Apenas os mais antigos, apesar da sua reduzida expressão cartográfica, poderão atingir espessuras da ordem de 20-30 metros, apresentando os restantes espessuras, geralmente, inferiores a 10 metros.

6.2.5 Aluviões

São geralmente constituídos por calhaus mal rolados e areias mais ou menos argilosas. O desenvolvimento máximo desta cobertura atinge-se na confluência dos rios Guadiana e Ardila e, mais a montante neste último rio, junto à Defesa de S. Braz, a norte de Moura.

Também as linhas de água menos importantes apresentam depósitos aluvionares em alguns troços, embora frequentemente sem expressão cartográfica. Como exemplos refira-se a Ribeira de Brenhas, a Ribeira da Toutalga e a Ribeira de S. Pedro.

6.2.6 A Bacia de Moura – Marmelar

Segundo Brum da Silveira (*in* Ficha do Sistema Aquífero Moura-Ficalho, do Relatório Final do ERHSA), a cobertura sedimentar da região Vidigueira-Moura é composta, no geral, por um conjunto de sedimentos detríticos de carácter continental (conglomerados, arenitos e lutitos), de idades atribuídas ao Terciário e Quaternário; assentam em discordância angular sobre o soco arrasado (ígneo e metamórfico) de idade Precâmbrico e Paleozóico (Feio, 1951; Carvalhosa e Carvalho, 1970; Alves, 1971). Estes depósitos compõem genericamente a Bacia de Moura-Marmelar (Brum da Silveira, 1990; Brum da Silveira *in* Oliveira *et al*, 1992).

Situada imediatamente a sul da Serra de Portel, a génese e evolução desta bacia, no Cenozóico, foi

fortemente condicionada pela tectónica, em particular, pela reactivação da Falha de Vidigueira-Moura, acidente que delimita o seu bordo setentrional. Esta estrutura activa, orientada segundo uma direcção geral WNW-ESE a E-W e com inclinação para N, corresponde a um antigo acidente varisco reactivado no Terciário e Quaternário com movimentação inversa direita (Brum da Silveira, 1990).

Na Bacia de Moura-Marmelar distinguem-se quatro unidades litoestratigráficas informais, limitadas por descontinuidades sedimentares regionais (Brum da Silveira, 1990); a sua idade, enquadramento e caracterização está sintetizada no modelo litoestratigráfico da Figura 6.5. Reconhecem-se também quatro níveis de terraços fluviais, escalonados, associados aos rios Guadiana e Ardila (Feio, 1946) e que marcaram o início da gliptogénese, isto é, do encaixe da do encaixe da rede de drenagem actual. Para além destes depósitos distinguem-se ainda aluviões e coluviões actuais.

IDADES PROVÁVEIS		UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS		SEQ. DEPOSICIONAIS RUPTURAS SEDIM.	CROSTAS		PALEO GEOGRAFIA	
					SILICIOSAS	CARBONATADAS		
QUATERNÁRIO	HOLOCÉNICO	ALUVIÕES COLUVIÕES					SISTEMAS FLUVIAIS DEPÓSITOS ACTUAIS VERTENTE	
	PLISTOCÉNICO	TERRAÇOS FLUVIAIS	T ₀				SISTEMAS FLUVIAIS	
			T ₁					
			T ₂					
	T ₃							
TERCIÁRIO	PLIOCÉNICO sup.	UNIDADE DE VALE DA SERRA	CONGLOMERADOS ARENITOS LUTITOS	R			LEQUES ALUVIAIS STREAMFLOW	
		UNIDADE DE MESAS	CONGLOMERADOS	SD 4			LEQUES ALUVIAIS DEBRIS-FLOW	
	MIOCÉNICO sup.	UNIDADE DE MARMELAR - MOURA	CALCÁRIOS PALUSTRES		R			SILICIFICAÇÃO PEDOGÉNESE EPIGÉNESE CARBONATADA SISTEMAS PALUSTRES LEQUES ALUVIAIS DEBRIS - FLOW
			CONGLOMERADOS		SD 2			
MIOCÉNICO inf. ou méd. ou PALEOGÉNICO	UNIDADE DE CASA BRANCA	ARENITOS		R			SILICIFICAÇÃO PEDOGÉNESE EPIGÉNESE CARBONATADA LEQUES ALUVIAIS MUD - FLOW DEBRIS - FLOW	
		ARENITOS CONGLOMERADOS		SD 1				
SOCO PALEOZÓICO								

Figura 6.5 - Modelo litoestratigráfico da Bacia Moura-Marmelar (adaptado de Brum da Silveira, 1990)

Na região ocorrem ainda paleossolos e outras manifestações da diagénese superficial. Entre estes, salientam-se dois horizontes de crostas carbonatadas (calcárias), desenvolvidos sobre rochas do soco paleozóico, ou sobre depósitos terciários; materializam dois episódios de pedogénese / epigénese carbonatada desenvolvida à escala regional do Alentejo, respectivamente no Paleogénico e/ou Miocénico inf. e Miocénico sup. e/ou Pliocénico inf. (Fig.1.2.4) (Brum da Silveira, 1990; Brum da Silveira *in* Oliveira *et al*, 1992).

Segundo este modelo litoestratigráfico, o registo sedimentar da bacia é composto pelas sequências deposicionais maiores SD1, SD2, SD3 e SD4, evidenciando quatro etapas de enchimento. Estas etapas, predominantemente clásticas, são interpretadas como a resposta sedimentar a quatro fases de reactivação da zona de falha Vidigueira-Moura. Com efeito, o enquadramento dos vários modelos deposicionais, em que predominam sistemas de leques aluviais enraizados na escarpa de falha, definem, sucessivamente para cada etapa, a elevação de uma área-fonte, localizada no bloco setentrional e o abatimento espasmódico de uma depressão alongada, de eixo E-W, no bloco meridional.

6.3 Rochas magmáticas intrusivas

Na zona SW da carta geológica apresentada (Figura 6.1) representam-se formações intrusivas que pertencem ao maciço de Beja. Trata-se dos chamados Pórfiros de Baleizão e do Complexo gabrodiorítico de Cuba. Por se ter adoptado uma legenda adaptada a partir da folha 8 da Carta Geológica de Portugal na escala 1/200.000, é ainda incluída na parte da legenda do maciço de Beja, uma intrusão granitóide (Granitos na legenda) que, segundo a notícia explicativa dessa mesma folha, se desenvolve, em grande parte, já fora dos limites do Maciço de Beja. Nos itens seguintes apresentam-se breves descrições dos Granitos, das formações do Maciço de Beja e das rochas intrusivas filonianas.

6.3.1 Granitos

Das rochas magmáticas intrusivas que ocorrem na região, as que ocupam maior extensão, incluindo as zonas de Pias e Vale de Vargo, constituem o maciço intrusivo de Pias, designado por Granitos de Pias. Apesar desta designação são incluídos alguns dioritos, embora se trate fundamentalmente de granitos de duas micas, de granularidade média, por vezes, porfiróide. Apresenta espessuras de alteração variáveis, chegando a atingir vários metros. A verdadeira extensão deste maciço intrusivo encontra-se mascarada pela cobertura terciária a norte. De facto, o encaixe de algumas linhas de água que circulam para W e NW denuncia o prolongamento deste maciço para NW, em direcção ao Pedrogão. Trata-se de uma intrusão tardi a pós-tectónica que dá origem a uma auréola de metamorfismo de contacto. Foi datada na zona de Pedrogão (datação

absoluta) com 305 M.A (Mendes, 1967-68; Pinto, 1985).

Segundo A. Carvalhosa na notícia explicativa da folha 8 da Carta Geológica à escala 1/200.000, estes granitóides, teriam origem infracrustal, estando relacionados com a subducção que teria ocorrido no bordo SW da ZOM, durante o Devónico-Carbónico.

6.3.2 Pórfiros de Baleizão

Trata-se de uma pequena mancha na zona SW da área cartografada, correspondente a rochas de origem vulcânica ácida, pós-metamórfica, que se distingue bem pela sua cor mais ou menos avermelhada que geralmente exhibe em afloramento. Apesar da heterogeneidade litológica frequente neste termo litoestratigráfico, são predominantes os dacitos e riódacitos.

Algumas datações absolutas para determinadas litofácies desta formação indicam idades que se enquadram entre o Tournaisiano superior e o Viseano (Andrade, 1974; Priem *et al*, 1986).

6.3.3 Complexo gabro-diorítico de Cuba

Trata-se de uma associação heterogénea de gabros e dioritos que, na zona de Vila Nova de S. Bento assume alguma expressão cartográfica. Os dioritos e gabros anfibólicos, por vezes, frequentes, são difíceis de distinguir macroscopicamente.

Segundo a notícia explicativa da folha 8 da Carta Geológica de Portugal na escala 1/200.000, as relações temporais e espaciais entre os diversos conjuntos plutónicos do Maciço de Beja está ainda mal conhecida, sendo certo que os Gabros de Beja correspondem às intrusões mais antigas (do Carbónico inferior?), e os Pórfiros de Baleizão (e possivelmente os Gabros - Dioritos de Cuba) às mais tardias (do Namuriano).

6.3.4 Rochas intrusivas filonianas

São essencialmente rochas intrusivas básicas, particularmente abundantes a NW de Vila Verde de Ficalho, onde os gabros cortam transversalmente algumas estruturas anticlinais carbonatadas. Existem ainda filões básicos que acompanham o acidente de Ferreira-Ficalho, com o qual se devem relacionar geneticamente.

ÍNDICE do capítulo 6

6	GEOLOGIA	21
6.1	Soco varisco	21
6.1.1	Série Negra.....	25
6.1.2	Formação Dolomítica.....	25
6.1.3	Complexo vulcano-sedimentar Ficalho-Moura.....	26
6.1.4	Complexo Vulcano-Sedimentar de Moura - Santo Aleixo (Formação de Xistos de Moura) 28	
6.1.5	Formação de Ossa.....	30
6.1.6	Formação de Barrancos.....	30
6.1.7	Formação de Santa Iria (D _{SI}).....	31
6.2	Terciário e Holocénico	31
6.2.1	Conglomerados, arenitos, margas com concreções calcárias e argilas, às vezes, com atapulgite.....	31
6.2.2	Argilas, margas, calcários e conglomerados.....	32
6.2.3	Ranhas do Baixo Alentejo.....	32
6.2.4	Terraços fluviais.....	33
6.2.5	Aluviões.....	33
6.2.6	A Bacia de Moura – Marmelar.....	33
6.3	Rochas magmáticas intrusivas	35
6.3.1	Granitos.....	35
6.3.2	Pórfiros de Baleizão.....	36
6.3.3	Complexo gabro-diorítico de Cuba.....	36
6.3.4	Rochas intrusivas filonianas.....	36

Índice de figuras:

Figura 6.1 - Mapa geológico da região, com indicação dos contornos do Sistema Aquífero Moura-Ficalho.....	23
Figura 6.2 - Divisões tectono – estratigráficas da Zona de Ossa Morena, em Portugal (Oliveira <i>et al</i> , 1991).....	25
Figura 6.3 - Sequência estratigráfica simplificada do Sector de Montemor-Ficalho (Oliveira <i>et al</i> , 1991).....	26
Figura 6.4 - Unidades definidas no troço do Sector do Anticlinal de Moura – Ficalho, coberto pela geotransversal do rio Guadiana (adaptado de Araújo, 1989 <i>in</i> Araújo, 1995).....	29
Figura 6.5 - Modelo litoestratigráfico da Bacia Moura–Marmelar (adaptado de Brum da Silveira, 1990).....	34

7 CLIMA

7.1 *Introdução*

Para a caracterização do clima de uma região, no que respeita à água, uma das técnicas correntemente utilizadas consiste na realização do balanço sequencial mensal da água no solo. A partir de valores médios mensais de precipitação e de evapotranspiração potencial e admitindo um determinado valor de capacidade de campo, calculam-se a evapotranspiração real e os excedentes ou déficits hídricos mensais. Com este conjunto de valores são quantificados vários índices climáticos em função dos quais se determina uma expressão climática.

A evapotranspiração potencial mensal pode ser calculada pelo método de Thornthwaite, para o que apenas é necessário a latitude do lugar e a temperatura média mensal.

Assim apenas será necessário dispor de valores de precipitação e temperatura médias mensais para se fazer este balanço. Outros parâmetros climáticos como a evaporação, a humidade do ar, os ventos e a insolação apenas foram considerados na quantificação da recarga, como adiante se verá.

Serão ainda apresentadas projecções quanto à evolução climática da região e os impactes previsíveis nos recursos hídricos subterrâneos.

7.2 *Balanço de água no solo*

Com base nos dados completos publicados pelo então Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (INMG) (Casimiro e Bettencourt, 1980), fez-se o balanço mensal da água no solo, utilizando o programa CEGEVAP (Almeida, 1979).

Na Figura 7.1 apresenta-se a localização das estações intervenientes e os polígonos de Thiessen correspondentes.

Os dados de base e os valores intervenientes constam das Tabela 7.1, Tabela 7.2, Figura 7.3, Tabela 7.4 e Tabela 7.5 e a sua representação gráfica nas Figura 7.2, Figura 7.3, Figura 7.4, Figura 7.5 e Figura 7.6, respectivamente.

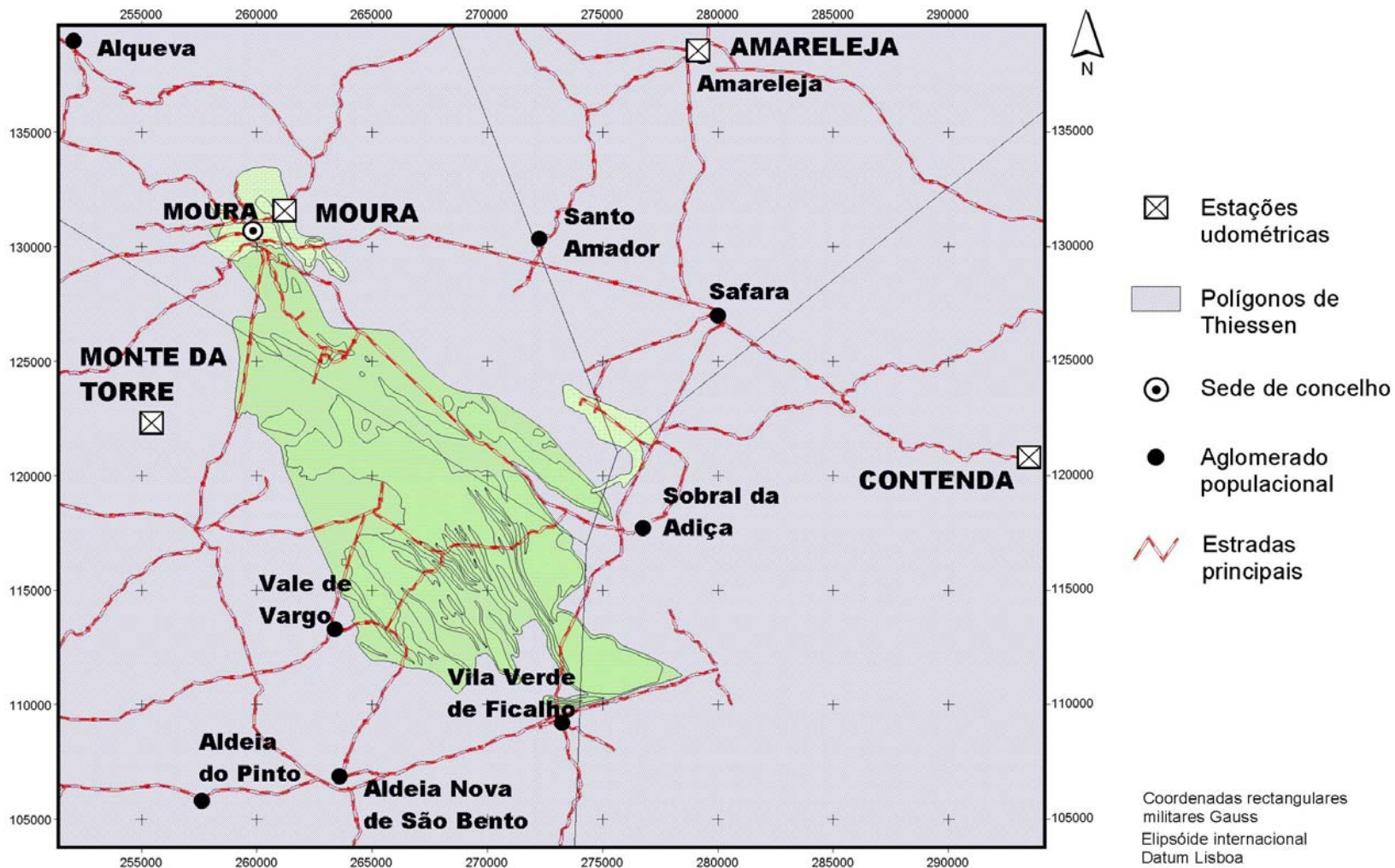


Figura 7.1 Estações climatológicas utilizadas na caracterização climática da região e respectivos polígonos de Thiessen.

Tabela 7.1 – Balanço mensal da água no solo (Moura).

Estação Meteorológica: Moura

Precipitação e temperaturas médias mensais

Período: 1941 - 63 Lat.: 38° 9' N ; Long.: 7° 26' W ; Alt.: 158 m.

Capacidade de Campo: 100 mm

Mês	T (°C)	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	P-ETP	PA	AS (mm)	D (mm)	S (mm)
Out	18,8	47,3	43,0	43,0	4,3		4,7	0,0	0,0
Nov	13,8	57,5	21,1	21,1	36,4		41,1	0,0	0,0
Dez	10,1	62,5	16,7	16,7	45,8		86,9	0,0	0,0
Jan	9,6	49,7	20,9	20,9	28,8		100,0	0,0	15,7
Fev	10,8	32,1	27,4	27,4	4,7		100,0	0,0	4,7
Mar	13,5	66,0	46,5	66,0	19,5		100,0	0,0	19,5
Abr	15,8	47,2	68,5	66,4	-21,3	-21,3	80,8	2,1	0,0
Mai	18,7	34,2	119,8	80,7	-85,6	-106,9	34,3	39,1	0,0
Jun	23,1	15,4	148,3	40,6	-132,9	-239,8	9,1	107,7	0,0
Jul	26,0	3,1	156,1	10,2	-153,0	-392,8	2,0	145,9	0,0
Ago	26,1	1,3	118,8	2,7	-117,5	-510,3	0,6	116,1	0,0
Set	23,2	21,1	72,5	21,3	-51,4	-561,7	0,4	51,2	0,0
ANUAL	17,5	437,4	859,6	417,0				462,1	39,9

P – Precipitação

ETP – Evapotranspiração Potencial

ETR – Evapotranspiração Real

PA – Perda de água potencial acumulada desde o início do período seco

AS – Água no solo

D – Déficit hídrico

S – Superavit hídrico

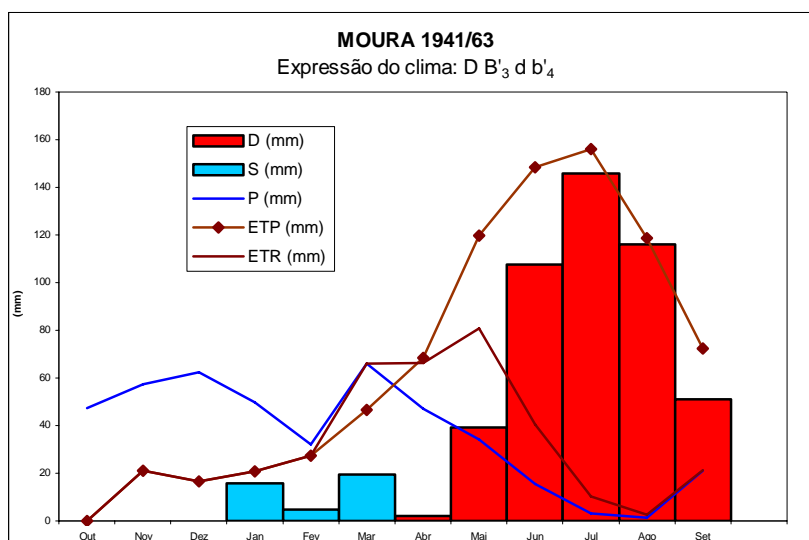


Figura 7.2 Balanço da água no solo – Moura

Tabela 7.2 – Balanço mensal da água no solo (Amieira).

Estação Meteorológica: Amieira

Precipitação e temperaturas médias mensais

Período: 1981 - 96 Lat.: 38° 04' N ; Long.: 7° 29' W ; Alt.: 200 m.

Capacidade de Campo: 100 mm

Mês	T (°C)	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	P-ETP	PA	AS (mm)	D (mm)	S (mm)
Out	13,4	59,3	43,0	43,0	16,3		16,8	0,0	0,0
Nov	9,7	81,4	21,1	21,1	60,3		77,0	0,0	0,0
Dez	8,4	78,5	16,7	16,7	61,8		100,0	0,0	38,8
Jan	9,4	73,9	20,9	20,9	53,0		100,0	0,0	53,0
Fev	11,9	53,8	27,4	27,4	26,4		100,0	0,0	26,4
Mar	13,5	33,4	46,5	45,7	-13,1	-13,1	87,7	0,8	0,0
Abr	16,7	60,3	68,5	67,2	-8,2	-21,3	80,8	1,3	0,0
Mai	21,4	46,2	119,8	88,3	-73,6	-94,9	38,7	31,5	0,0
Jun	24,7	22,7	148,3	50,4	-125,6	-220,4	11,0	97,9	0,0
Jul	24,8	5,2	156,1	13,8	-150,9	-371,3	2,4	142,3	0,0
Ago	21,9	4,4	118,8	6,1	-114,4	-485,7	0,8	112,7	0,0
Set	17,9	21,9	72,5	22,2	-50,6	-536,3	0,5	50,3	0,0
ANUAL	16,1	541,0	859,6	422,8				436,8	118,2

P – Precipitação

ETP – Evapotranspiração Potencial

ETR – Evapotranspiração Real

PA – Perda de água potencial acumulada desde o início do período seco

As – Água no solo

D – Deficit hídrico

S – Superavit hídrico

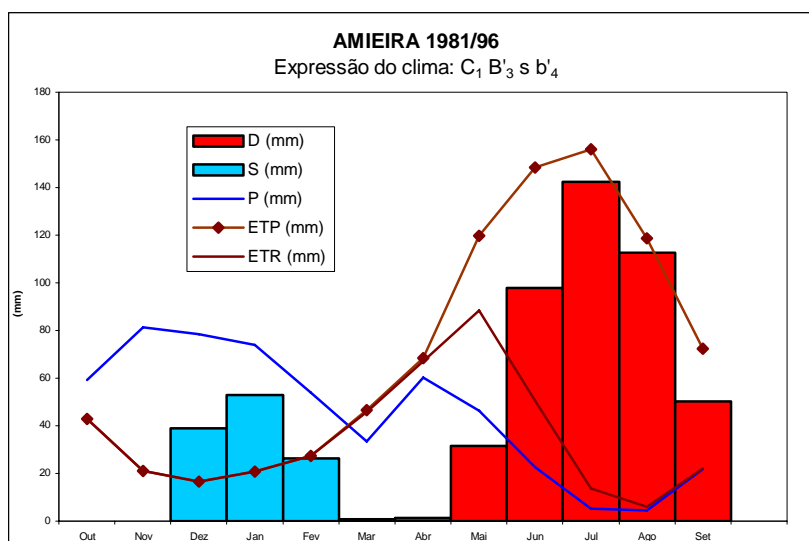


Figura 7.3 Balanço da água no solo – Amieira

Tabela 7.3 – Balanço mensal da água no solo (Monte da Torre).

Estação Meteorológica: Monte da Torre

Precipitação e temperaturas médias mensais

Período: 1981 - 96. Lat.: 38° 04' N ; Long.: 7° 29' W ; Alt.: 200 m.

Capacidade de Campo: 100 mm

Mês	T (°C)	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	P-ETP	PA	AS (mm)	D (mm)	S (mm)
Out	17,3	36,5	69,3	69,3	-32,8	-465,9	0,9	0,0	0,0
Nov	11,6	81,9	31,3	31,3	50,6		51,6	0,0	0,0
Dez	8,2	69,7	18,4	18,4	51,3		100,0	0,0	2,8
Jan	9,3	72,1	23,2	23,2	48,9		100,0	0,0	48,9
Fev	9,5	61,2	21,2	21,2	40,0		100,0	0,0	40,0
Mar	11,2	22,3	37,6	36,5	-15,3	-15,3	85,8	1,1	0,0
Abr	13,7	63,5	53,1	53,1	10,4		96,2	0,0	0,0
Mai	16,7	43,4	83,4	72,6	-40,0	-40,0	67,0	10,8	0,0
Jun	19,9	25,1	106,7	62,5	-81,6	-121,7	29,6	44,2	0,0
Jul	22,7	8,7	137,0	30,1	-128,3	-249,9	8,2	106,9	0,0
Ago	22,2	7,6	124,0	13,3	-116,4	-366,3	2,6	110,7	0,0
Set	20,3	25,5	92,3	26,8	-66,8	-433,1	1,3	65,5	0,0
ANUAL	15,2	517,4	797,5	458,2				339,3	91,7

P – Precipitação

ETP – Evapotranspiração Potencial

ETR – Evapotranspiração Real

PA – Perda de água potencial acumulada desde o início do período seco

As – Água no solo

D – Deficit hídrico

S – Superavit hídrico

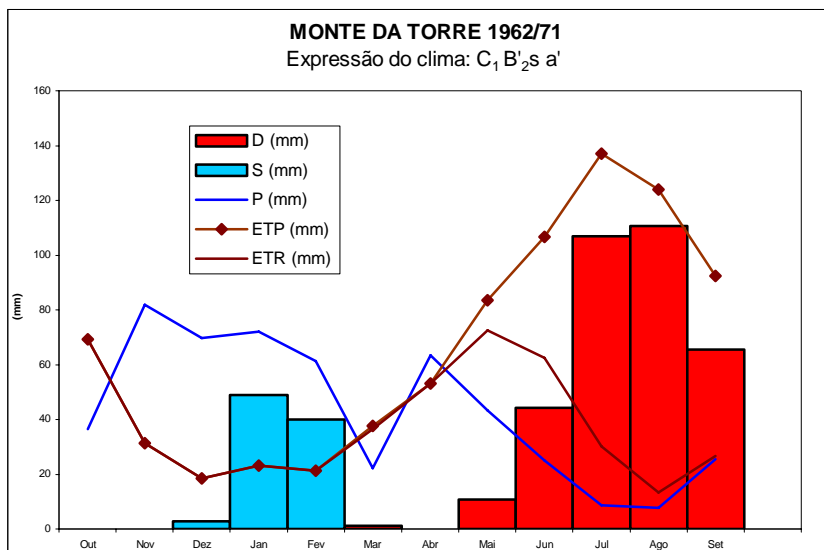


Figura 7.4 Balanço da água no solo – Monte da Torre

Tabela 7.4 – Balanço mensal da água no solo (Contenda).

Estação Meteorológica: Contenda

Precipitação e temperaturas médias mensais

Período: 1961 – 80 Lat.: 38° 04' N ; Long.: 7° 29' W ; Alt.: 200 m.

Capacidade de Campo: 100 mm

Mês	T (°C)	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	P-ETP	PA	AS (mm)	D (mm)	S (mm)
Out	17,3	88,3	67,0	67,0	21,3		22,2	0,0	0,0
Nov	12,3	85,6	32,3	32,3	53,3		75,5	0,0	0,0
Dez	9,5	75,3	21,4	21,4	53,9		100,0	0,0	29,4
Jan	9,3	114,1	21,4	21,4	92,7		100,0	0,0	92,7
Fev	10,0	105,6	21,3	21,3	84,3		100,0	0,0	84,3
Mar	11,2	83,6	35,2	35,2	48,4		100,0	0,0	48,4
Abr	13,3	60,4	48,0	48,0	12,4		100,0	0,0	12,4
Mai	16,7	41,6	80,5	73,8	-38,9	-38,9	67,8	6,7	0,0
Jun	20,5	36,6	109,5	71,7	-72,9	-111,8	32,7	37,8	0,0
Jul	24,1	6,7	149,2	31,5	-142,5	-254,3	7,9	117,7	0,0
Ago	24,3	4,2	141,7	10,1	-137,5	-391,8	2,0	131,6	0,0
Set	21,8	27,5	101,6	28,5	-74,1	-465,9	0,9	73,1	0,0
ANUAL	15,9	729,5	829,1	462,3				366,8	267,2

P – Precipitação

ETP – Evapotranspiração Potencial

ETR – Evapotranspiração Real

PA – Perda de água potencial acumulada desde o início do período seco

As – Água no solo

D – Deficit hídrico

S – Superavit hídrico

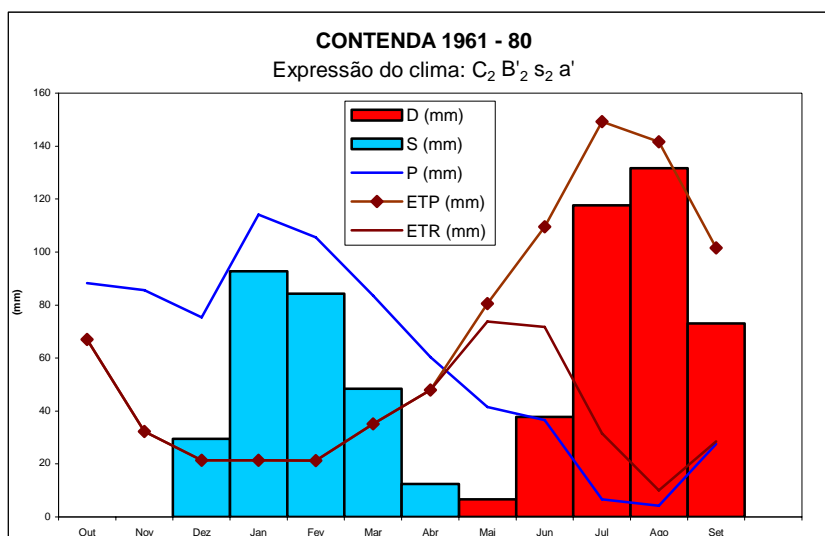


Figura 7.5 Balanço da água no solo - Contenda

Tabela 7.5 – Balanço mensal da água no solo (Amareleja).

Estação meteorológica - Amareleja

Precipitação e temperaturas médias mensais

Período: 1963 - 80 Lat.: 38° 13' N ; Long.: 7° 13' W ; Alt.: 192 m.

Capacidade de Campo: 100 mm

Mês	T (°C)	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	P-ETP	PA	AS (mm)	D (mm)	S (mm)
Out	17,4	61,1	67,6	67,6	-6,5	-520,4	-5,9	0,0	0,0
Nov	12,1	59,0	31,4	31,4	27,6		21,7	0,0	0,0
Dez	8,8	62,8	18,8	18,8	44,0		65,7	0,0	0,0
Jan	8,9	71,3	19,9	19,9	51,4		100,0	0,0	17,1
Fev	9,9	79,0	20,9	20,9	58,1		100,0	0,0	58,1
Mar	11,2	66,5	35,1	66,5	31,4		100,0	0,0	31,4
Abr	13,5	41,7	49,2	48,9	-7,5	-7,5	92,8	0,3	0,0
Mai	17,0	31,8	82,8	68,9	-51,0	-58,5	55,7	13,9	0,0
Jun	21,0	32,4	114,0	63,5	-81,6	-140,1	24,6	50,5	0,0
Jul	24,4	2,8	152,4	21,9	-149,6	-289,7	5,5	130,5	0,0
Ago	24,1	1,1	139,9	5,2	-138,8	-428,5	1,4	134,7	0,0
Set	21,8	16,1	101,5	16,9	-85,4	-513,9	0,6	84,6	0,0
ANUAL	15,8	525,6	833,5	450,4				414,5	106,6

P - Precipitação

ETP - Evapotranspiração Potencial

ETR - Evapotranspiração Real

PA - Perda de água potencial acumulada desde o início do período seco

As - Água no solo

D - Deficit hídrico

S - Superavit hídrico

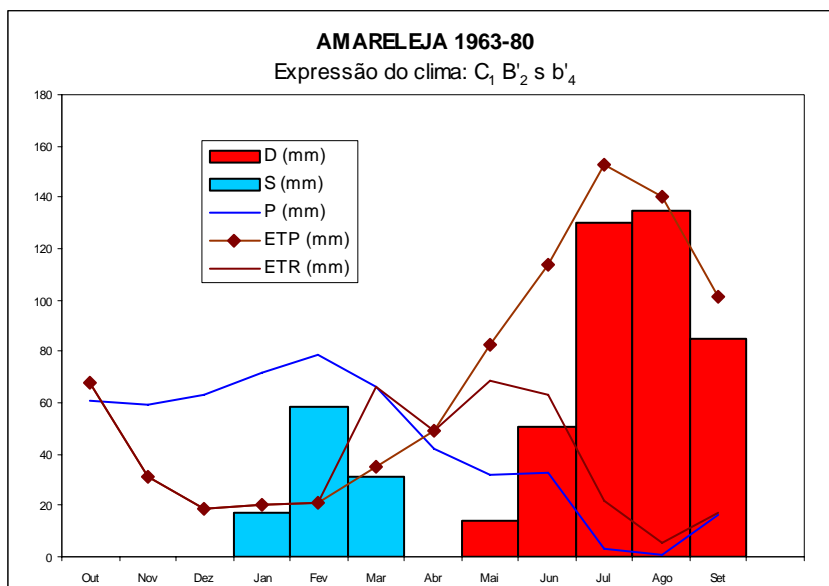


Figura 7.6 Balanço da água no solo – Amareleja

7.3 Caracterização climática

A análise apresentada sugere que as diferenças encontradas de estação para estação resultam de dois factores:

- As séries temporais não terem sempre a mesma duração, e
- O relevo da região constituir um factor importante na localização e intensidade dos episódios chuvosos.

Tabela 7.6 – Caracterização climática das estações com base no balanço da água no solo.

Posto udométrico	Temperatura média anual (°C)	Precipitação anual (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	Déficite hídrico (mm)	Superavite hídrico (mm)	Expressão do clima	Altitude (m)	N.º anos
Moura	17,5	437,4	816,6	374,0	462,1	39,9	D B`3 d b`4	158	21
Monte da Torre	15,2	517,4	797,5	458,2	339,3	91,7	C1 B`2s a`	200	14
Amieira	16,1	541,0	859,6	422,8	436,8	118,2	C1 B`3 s b`4	200	14
Contenda	15,9	729,5	829,1	462,3	366,8	267,2	C2 B`2 s2 a`	200	18
Amareleja	15,8	525,6	833,5	450,4	414,5	106,6	C1 B`2 s b`4	192	16

A observação dos valores constantes na Tabela 7.6, fundamenta as seguintes conclusões:

- A temperatura média anual é da ordem de 16°C (entre 15,2 e 17,5°C);
- A precipitação total anual é da ordem de 550mm, pelo menos nas zonas de altitudes até 200 m (entre 437 e 730mm);
- A evapotranspiração potencial anual é da ordem de 827mm (entre 798 e 860mm);
- A evapotranspiração real anual é da ordem de 434mm (entre 374 e 462mm);
- O deficit hídrico anual é da ordem de 404mm (entre 339 e 462mm);
- O superavite hídrico anual é da ordem de 125mm, nas zonas de altitude até 200 m (entre 40 e 267mm);
- O clima da região é sub-húmido seco, 2º mesotérmico e com superavit de água moderado no inverno, na maior parte das estações.

Se for considerada a estação da Contenda, a precipitação é significativamente superior e, conseqüentemente, toda a classificação climática se altera. Se for considerada apenas a estação de Moura, também se chegam a conclusões diferentes, mas de sinal contrário, isto é:

- Contenda – Clima sub-húmido húmido, com deficit de água grande no verão;
- Moura – Clima semi-árido, com excedentes de balanço praticamente nulos.

De um modo geral poderá dizer-se que se trata de uma região caracterizada por uma concentração

dos excedentes hídricos ao nível do solo durante os meses de Dezembro a Março, predominando durante o resto do ano os défices hídricos, que atingem o máximo durante os meses de Julho e Agosto.

A dispersão dos valores encontrados é particularmente acentuada no que respeita aos excedentes hídricos (40 a 267 mm). Estes valores não podem ser considerados na avaliação da recarga por várias razões, especialmente por a base temporal mensal considerada ser excessivamente grande e por se tratar de uma região com um substrato carbonatado e carsificado em vastas áreas, como se verá no capítulo seguinte.

7.4 Alterações climáticas

Segundo *Climate Changes in Portugal – Scenarios, Impacts and Adaptation Measures* (SIAM) (Santos *et al.*, 2002), as alterações previstas para o País no que respeita à temperatura, baseada no modelo *HadRM2* (*Hadley Centre for Climate Prediction*, modelo regional) é a que consta da Figura 7.7. Pode constatar-se que a previsão é de um aumento de 6,0 a 6,5 °C até ao ano 2100, para a região de estudo. Os outros modelos considerados no SIAM e no Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC), no seu 4º Relatório (Christensen *et al.*, 2007), apontam para previsões no mesmo sentido. Prevêem-se aumentos nos valores médios mensais da temperatura do ar nos meses de Inverno mas, esses aumentos serão maiores nos meses de verão, configurando um aumento na amplitude térmica anual.

No que respeita à precipitação as previsões de vários modelos para o ano 2100 apontam no sentido de reduções na precipitação média anual da ordem de 10 a 30%, nas bacias do Sado e Guadiana.

Na Figura 7.8 apresenta-se a previsão do modelo *HadRM2* para a precipitação total anual no ano 2100.

Prevêem-se ainda alterações na distribuição anual da precipitação mas, neste caso, os resultados das várias simulações não são tão consistentes. Assim, segundo os resultados do modelo global *HadCM3*, as previsões quanto à evolução da distribuição da precipitação ao longo do ano para a zona sul do País, é a que se apresenta na Figura 7.9, que se traduz na redução generalizada a todos os meses do ano, enquanto as previsões que resultam do modelo regional *HadRM2*, indicam redução menor no valor médio anual, fazendo-se esta à custa de reduções acentuadas no período de Abril a Novembro (Figura 7.10). No período de Dezembro a Fevereiro prevêem-se aumentos na precipitação mensal, não havendo variação em relação ao mês de Março. Assim, segundo este modelo, a região passará a ter um período seco mais prolongado e um chuvoso mais curto e de maior precipitação.

Para uma análise mais pormenorizada dos impactos das alterações climáticas nos recursos hídricos nacionais, consulte-se diversos trabalhos relacionados com o projecto SIAM (Veiga da Cunha, *et*

al., 2006, Veiga da Cunha, *et al.*, 2007) e outros (Nascimento, *et al.*, 2004 e Nascimento, *et al.*, 2005).

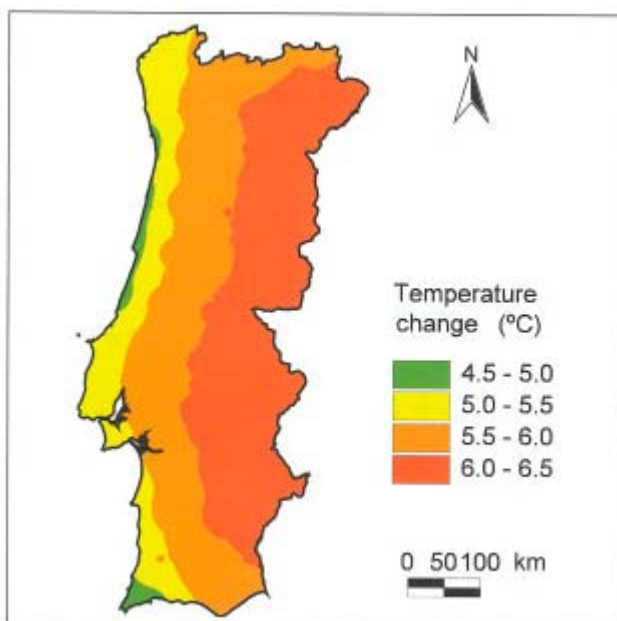


Figura 7.7 - Alteração na temperatura média anual em 2100, segundo o modelo *HadRM2*. (in Santos *et al.*, 2002)

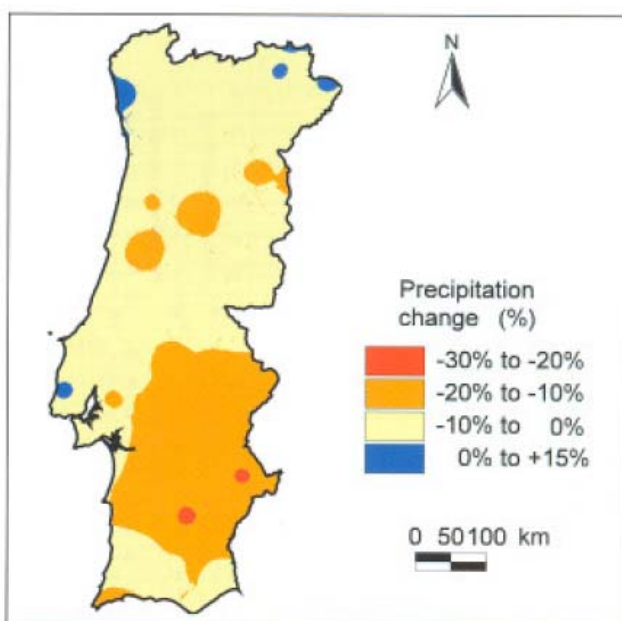


Figura 7.8 Alteração na precipitação no ano 2100, segundo o modelo *HadRM2* (in Santos *et al.*, 2002).

Com as previsões apontadas pode concluir-se que se prevê, em relação à zona de estudo:

a) Aumento da colmatção das estruturas cársicas responsáveis por uma parte importante da recarga do aquífero, devido ao maior arrastamento de sólidos no escoamento superficial;

- b) Aumento da evapotranspiração potencial e real;
- c) Aumento do risco de cheias na principal bacia hidrográfica envolvida (Ribeira de Brenhas);
- d) Redução da infiltração eficaz e, por isso, da recarga do aquífero;
- e) Aumento da pressão sobre os aquíferos, resultante do aumento de necessidades hídricas.



Figura 7.9 Distribuição da precipitação mensal, segundo o modelo HadCM3 (in Santos *et al.*, 2002).

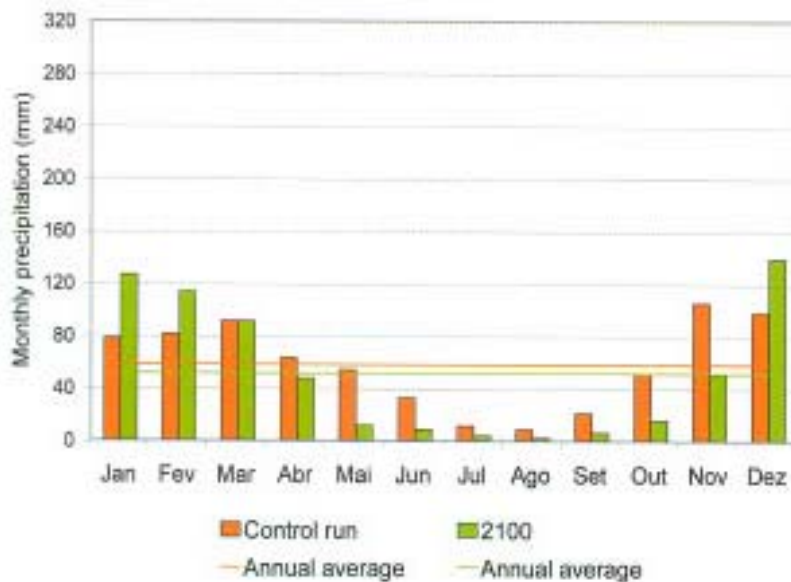


Figura 7.10 Distribuição da precipitação mensal, segundo o modelo HadRM2 (in Santos *et al.*, 2002).

ÍNDICE do Capítulo 7

7 CLIMA	37
7.1 Introdução	37
7.2 Balanço de água no solo	37
7.3 Caracterização climática	44
7.4 Alterações climáticas	45

Índice de Figuras

Figura 7.1 Estações climatológicas utilizadas na caracterização climática da região e respectivos polígonos de Theissen.	38
Figura 7.2 Balanço da água no solo – Moura	39
Figura 7.3 Balanço da água no solo – Amieira	40
Figura 7.4 Balanço da água no solo – Monte da Torre.....	41
Figura 7.5 Balanço da água no solo - Contenda	42
Figura 7.6 Balanço da água no solo – Amareleja	43
Figura 7.7 - Alteração na temperatura média anual em 2100, segundo o modelo <i>HadRM2</i> . (in Santos <i>et al.</i> , 2002)	46
Figura 7.8 Alteração na precipitação no ano 2100, segundo o modelo <i>HadRM2</i> (in Santos <i>et al.</i> , 2002).	46
Figura 7.9 Distribuição da precipitação mensal, segundo o modelo <i>HadCM3</i> (in Santos <i>et al.</i> , 2002).	47
Figura 7.10 Distribuição da precipitação mensal, segundo o modelo <i>HadRM2</i> (in Santos <i>et al.</i> , 2002).	47

Índice de Tabelas

Tabela 7.1 – Balanço mensal da água no solo (Moura).	39
Tabela 7.2 – Balanço mensal da água no solo (Amieira).	40
Tabela 7.3 – Balanço mensal da água no solo (Monte da Torre).	41
Tabela 7.4 – Balanço mensal da água no solo (Contenda).	42
Tabela 7.5 – Balanço mensal da água no solo (Amareleja).	43
Tabela 7.6 – Caracterização climática das estações com base no balanço da água no solo.	44

8 SISTEMA AQUÍFERO MOURA-FICALHO

O escoamento hídrico subterrâneo desta região é dominado pela existência de um aquífero de tipo cársico-fissurado que se desenvolve entre Vila Verde de Ficalho e Moura (Aquífero Moura-Ficalho). Foram ainda identificados outros aquíferos, de menores dimensões e parcialmente dependentes deste, que poderão designar-se por secundários (Costa, 1991) e identificadas áreas de maior potencial aquífero. Assim, em síntese temos:

- Aquífero Moura-Brenhas
- Aquífero dos Calcários de Moura
- Aquífero da Ribeira de Toutalga
- Áreas de maior potencial aquífero

De um modo geral poderá dizer-se que os potenciais hidráulicos maiores e as maiores permeabilidades se encontram no aquífero principal. Nas zonas envolventes deste aquífero principal, existem formações que recebem água de descarga do sistema principal, apresentando capacidades aquíferas superiores às que de outra forma teriam.

Na Figura 8.1 representa-se o Sistema Aquífero Moura-Ficalho.

8.1 Aquífero Moura-Ficalho

Este é o principal e mais extenso aquífero da região, com uma área total da ordem de 187 Km², da qual apenas 85 Km² correspondem a afloramentos de rochas carbonatadas. O suporte físico do aquífero é constituído essencialmente por rochas carbonatadas do soco varisco:

- dolomitos do Câmbrio inferior (Formação dolomítica);
- mármore calcíticos e calcários dolomíticos, por vezes, com intercalações de meta-vulcanitos, do Ordovício médio (Complexo vulcano-sedimentar de Moura-Ficalho).

Os contornos do aquífero Moura-Ficalho representados na Figura 8.1 correspondem a contrastes litológicos entre as formações essencialmente carbonatadas do aquífero e as formações de baixa condutividade hidráulica que as envolvem. Em geral, estes contactos geológicos situar-se-ão, do ponto de vista litoestratigráfico, na parte superior do Complexo vulcano-sedimentar de Moura-Ficalho. Além destes contactos geológicos normais (por subida ou descida na sequência litoestratigráfica), a que poderá chamar-se contactos litoestratigráficos, existem outros que correspondem a contactos com rochas intrusivas, passando ainda por contactos tectónicos. Na mesma Figura 8.1, representa-se o contorno que se pensa melhor representar o sistema aquífero Moura-Ficalho.

Com a prospecção geofísica e as sondagens mecânicas feitas no âmbito do ERHSA (Costa, 2001) e noutros trabalhos (Costa, 1988; Costa *et al*, 1998), são hoje conhecidos muitos aspectos da geometria deste aquífero. Em particular, sabe-se que a espessura é geralmente grande; a base

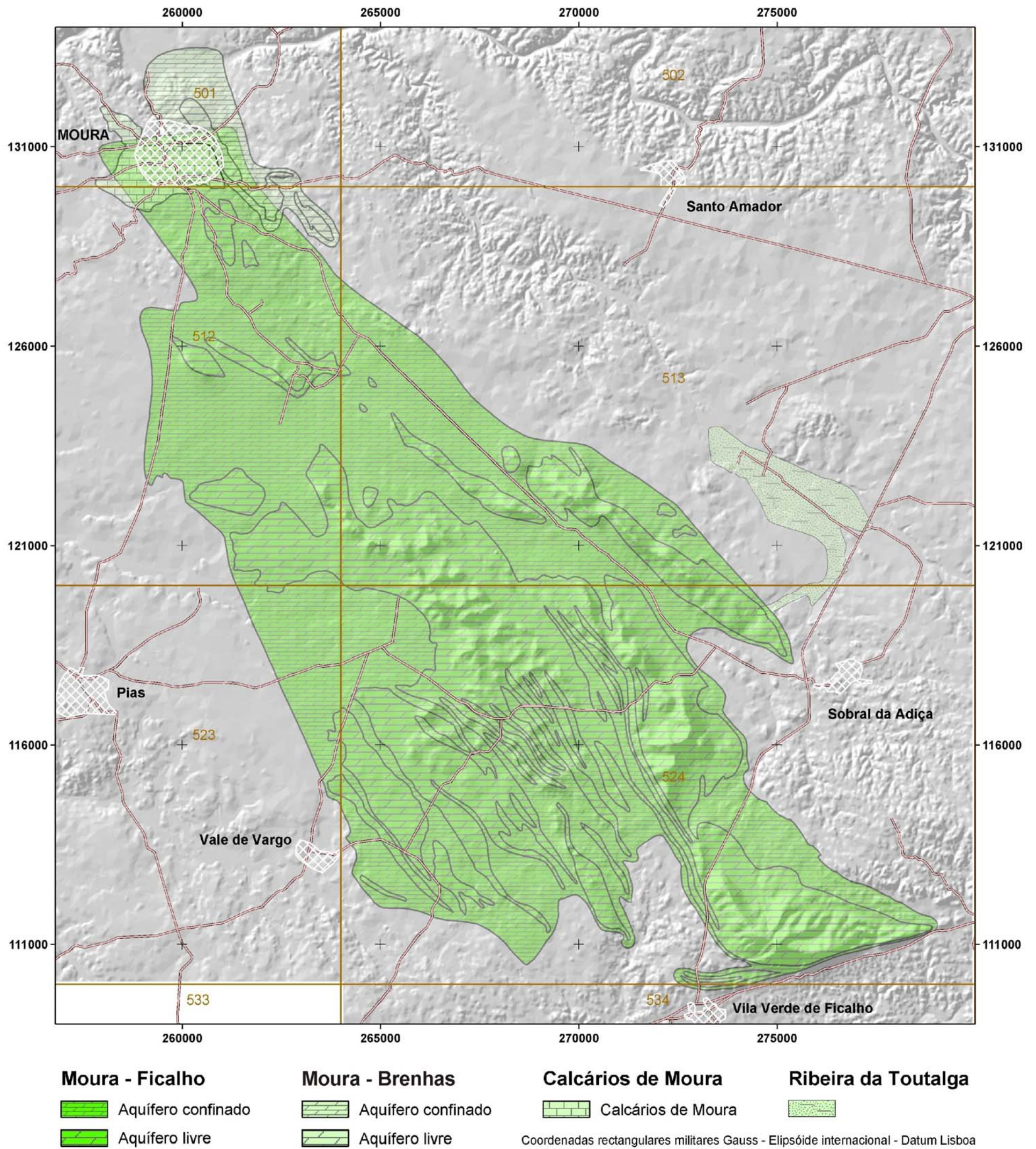


Figura 8.1 Sistema Aquífero Moura-Ficalho.

do aquífero se situará abaixo dos 600 metros de profundidade em Moura, onde, no Castelo de Moura, o tecto do aquífero foi intersectado a 84 metros. A cerca de 1.5 Km a SE desta cidade, junto ao Casal de Santo André, o tecto do aquífero já se situa a 398 metros de profundidade, enquanto mais a norte, junto ao Outeiro de Santo António (no local da sondagem SHSantoAntónio1), o tecto do mesmo aquífero se situa a cerca de 280 m de profundidade.

Com base, não só em características pontuais como as referidas, mas também em considerações geológico-estruturais incluídas no capítulo sobre GEOLOGIA, foi concebido o modelo tridimensional do aquífero Moura-Ficalho representado na Figura 8.2. Como se pode observar trata-se de um aquífero muito irregular e com espessura muito variável.

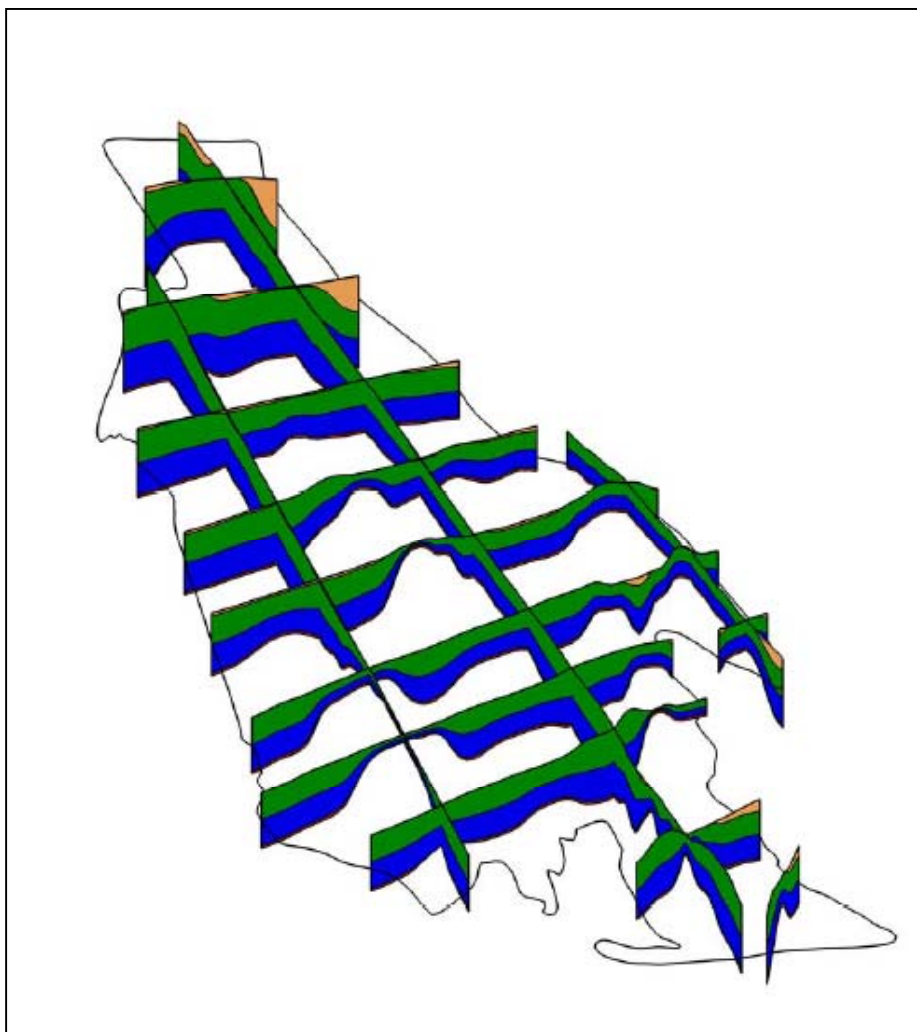


Figura 8.2 Modelo conceptual da geometria tridimensional do aquífero Moura-Ficalho, considerando duas camadas, a verde e a azul. Em tom amarelado representa-se a camada confinante

Este aquífero tem um comportamento cársico-fissurado que, embora se apresente livre em várias zonas é, na maior parte da sua extensão um aquífero confinado, como se pode observar no mapa

da Figura 8.1. A permeabilidade reduz-se em profundidade, passando dos valores elevados característicos de um meio cársico, a valores pequenos, característicos de um meio fissurado, como se pode constatar com a realização de o ensaio com “packers” realizado na sondagem SD3Bicas1, situada no interior do Castelo de Moura.

O fluxo subterrâneo regionalmente é condicionado pela orientação dos eixos das dobras, processando-se predominantemente no sentido SE-NW (Costa, 1991). A uma escala mais local, e mesmo em alguns sectores do aquífero, observam-se várias situações de fluxos segundo a direcção E-W e outras em que o fluxo é inverso, do quadrante NW para SE, como se verá na apresentação dos resultados da simulação do escoamento neste aquífero.

O bloco diagrama da Figura 8.3 representa, de forma simplificada, os aspectos principais de funcionamento do aquífero. Saliente-se os seguintes aspectos:

- A recarga faz-se exclusivamente a partir da água da chuva. Uma parte da recarga faz-se por infiltração profunda da água de precipitação, após um trajecto, geralmente curto, em que esta se escoia superficialmente até atingir estruturas cársicas dos tipos algar, dolina e uvala. Outra parte da recarga é mais diferida no tempo e corresponde á água que, após saturação da capacidade de campo dos solos argilosos (argilas residuais do tipo “terra rossa” e os solos argilosos das coberturas terciárias que cobrem áreas significativas do aquífero), escapa aos processos de evaporação e transpiração, atravessando toda a zona não saturada até atingir o aquífero, a maior ou menor profundidade.
- A circulação subterrânea faz-se através de uma densa rede de fracturas, parcialmente transformadas, por carsificação, em conductas cársicas de dimensões muito variadas, que traduzem a diversidade de condutividade hidráulica que se encontra no aquífero.
- A elevada densidade da rede de fracturas anteriormente referida permite que sejam atravessados pela água alguns níveis de metavulcanitos, desde que estes não sejam demasiado espessos e lateralmente contínuos.
- Os contornos do aquífero são do tipo barreira impermeável sempre que esse limite corresponde ao contacto com as rochas intrusivas do maciço de Pias, provavelmente, por se tratar de rochas com uma permeabilidade praticamente nula que não foram afectadas pela maior parte das acções tectónicas que afectaram a região. O “contacto litoestratigráfico” anteriormente definido, muito embora também se possa comportar como uma barreira negativa nem sempre tem este comportamento hidráulico, podendo corresponder a zonas de transferências hídricas subterrâneas ocultas, como sucede nas vertentes NE das serras de Ficalho e da Preguiça.

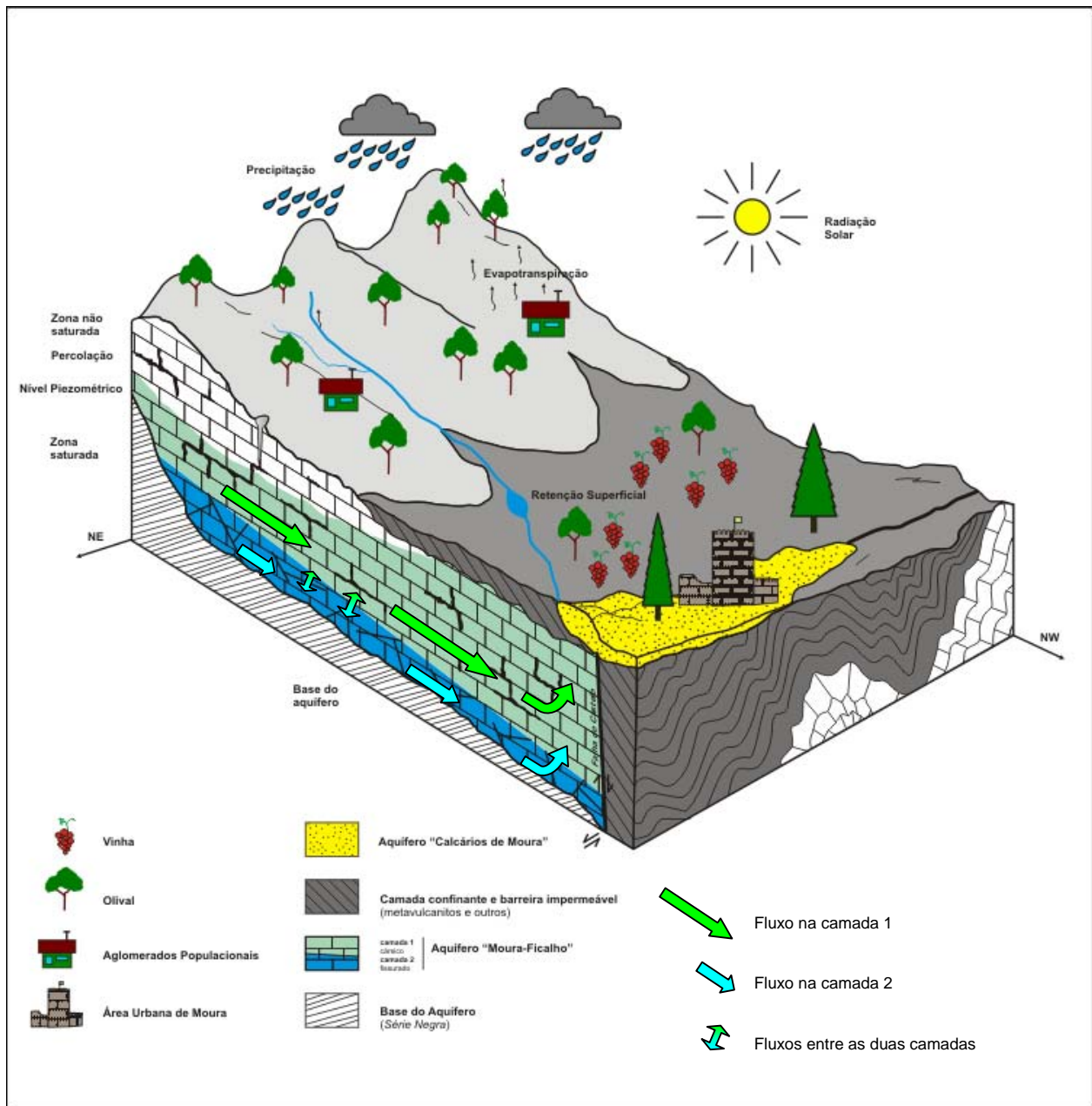


Figura 8.3 Bloco diagrama simplificado do aquífero Moura-Ficalho

- Quando a envolvente do aquífero é constituída por formações das coberturas terciárias, estas apresentam alguma condutividade hidráulica, embora geralmente muito inferior à do aquífero, podendo haver transferências hídricas subterrâneas entre o aquífero e estas formações, traduzidas em quebras significativas no potencial hidráulico, como se observa na zona a este e sudeste de Moura.
- O limite norte do aquífero é constituído pela *falha do castelo*, já anteriormente referida (vide

capítulo 5), que se comporta essencialmente como uma barreira de muito baixa condutividade hidráulica horizontal originando fluxos verticais significativos através da rede de fracturas (recarga subterrânea do aquífero dos *Calcários de Moura* e emergências termais de Santa Comba e Três Bicas).

- A condutividade hidráulica do aquífero diminui em profundidade, o que se traduz, no modelo conceptual representado na Figura 8.3, na existência de dois níveis aquíferos, sendo o mais profundo caracterizado por fluxos muito lentos. Os fluxos entre estes dois níveis aquíferos são mais importantes junto à *falha do castelo*, como foi referido anteriormente.

Na extremidade SE da serra de Ficalho, a direcção de fluxo chega a ser do quadrante oeste para o quadrante leste, em direcção à nascente de Rosal de la Frontera (Espanha). Também na zona de Serra Alta-Serra da Abelheira, em que, como se verá, existe uma divisão de águas, observam-se sentidos de fluxo inversos, para NW a norte desta zona e para SE a sul, em direcção a Moura e à nascente do Gargalão (na zona terminal da dobra da Preguiça), respectivamente. Existem ainda algumas nascentes observadas (e outras ocultas) na vertente NE da serra da Preguiça, que também condicionam o sentido do escoamento subterrâneo.

Como se verá seguidamente, esta dificuldade na descarga natural do aquífero Moura-Ficalho, além da estar na origem das nascentes termais antes referidas (cerca de 21º/22º na emergência) e da recarga subterrânea do aquífero dos *Calcários de Moura*, contribui para a recarga do *Aquífero da Ribeira da Toutalga*, além de outras transferências hídricas da região.

Uma das características geológicas mais importantes para a formação deste aquífero, com as particularidades que apresenta e as relações com os restantes sub-sistemas parcialmente dependentes, é o sistema de falhas, que o limita a norte, relacionado com a falha da Vidigueira e em particular com a *falha do castelo*. Esta falha faz parte integrante do "graben", aproveitado pelo troço final do Rio Ardila na sua confluência com o Rio Guadiana, e comporta-se como barreira de baixa condutividade hidráulica horizontal, evitando o que seria a tendência natural deste aquífero, isto é, descarregar junto à foz do rio Ardila (hipótese de trabalho inicialmente admitida). Esta falha, cujas evidências geológicas apenas recentemente se começaram a detectar, deve ter tido uma movimentação tal que impôs uma barreira na estrutura que se desenvolve desde Enfermarias até ao Castelo de Moura (estrutura esta situada, no interior do castelo, a uma profundidade de 44,9 metros, sob a cobertura terciária). A sua continuação para NW deve corresponder aos afloramentos de calcários dolomíticos e de metavulcanitos que se situam junto da foz do Rio Ardila (ver mapa geológico e bloco diagrama). Só admitindo esta barreira, que provavelmente resulta da tectonização e argilização das fácies de origem vulcânica do Câmbrico e do Ordovícico, se pode explicar que no interior do Castelo de Moura (a uma cota superior a +185 m) existam nascentes termais e que a sondagem efectuada neste local (SD3Bicas1) tenha, como se previa, artesianismo repuxante

(recorde-se que a foz do Ardila se situa a uma cota aproximada +80 m).

Pensa-se que a situação descrita, que se pretende representar no bloco diagrama da Figura 8.3, poderá constituir o elemento-chave para a explicação de várias particularidades deste aquífero:

- A profundidade excepcional que os fenómenos de carsificação atingem;
- A comunicação hidráulica entre este aquífero e o da cobertura terciária que se lhe sobrepõe (*Aquífero dos Calcários de Moura*);
- As amplitudes piezométricas e de caudais de nascentes relativamente reduzidas quando comparadas com outros aquíferos cársicos.

Como se verá oportunamente, os gradientes hidráulicos são pequenos na zona terminal do aquífero e as próprias variações sazonais de níveis também são pequenas, quando comparadas com as que se observam nas zonas de Vale de Vargo e Palhais (piezómetros VVargo e SHPalhais2). Refira-se contudo que, mesmo aqui, as oscilações piezométricas sazonais são frequentemente, inferiores a 5 metros, o que é claramente inferior aos valores que se observam noutros aquíferos instalados em formações, litoestratigraficamente equivalentes (por exemplo, no anticlinal de Estremoz ou na estrutura de Monforte-Alter do Chão). A comparação com outros aquíferos francamente cársicos, como os das orlas mesocenozóicas ocidental e meridional, ainda evidencia mais esta particularidade. Supõe-se que o facto de não haver presentemente uma descarga natural “fácil” do aquífero para o que seria o seu nível de base “natural” (o Rio Ardila), devido a condicionantes tectónicas que intervieram durante o Cenozóico, poderá ter sido decisiva, quer na evolução cársica da região quer nas particularidades do comportamento hidráulico deste aquífero, com foi referido.

As afirmações anteriores baseiam-se essencialmente nos registos piezométricos que estão em funcionamento (Figura 8.4) e que foram nivelados topograficamente, complementados com algumas medições em outros pontos de observação (furos de abastecimento público e cotas de nascentes).

Os valores de transmissividade calculados através de vários ensaios de aquífero na zona menos profunda deste aquífero, como se verá, situam-se entre cerca de 200 m²/dia e cerca de 3.500 m²/dia. O coeficiente de armazenamento num ensaio com piezómetro próximo de uma nascente foi 0,20.

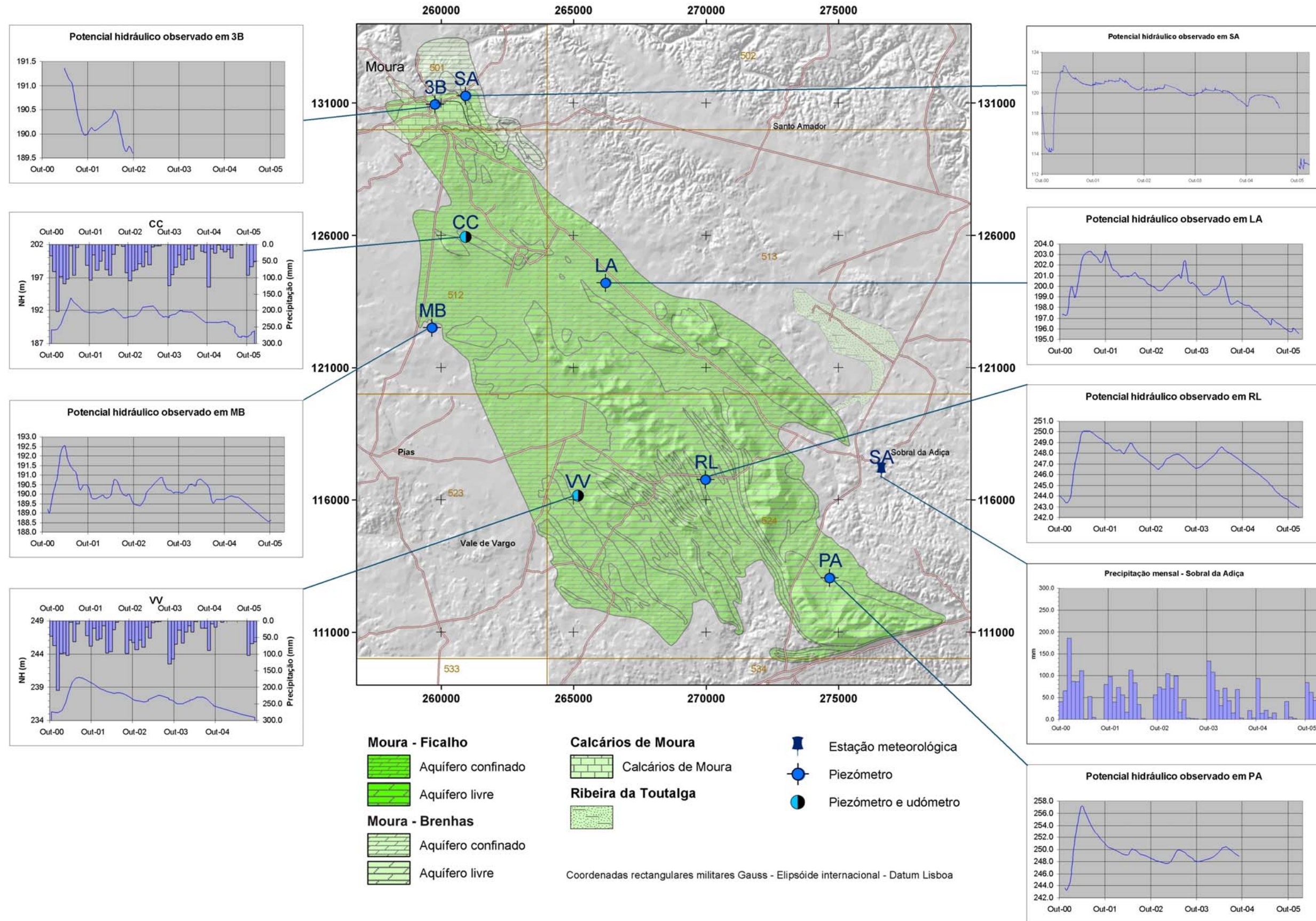


Figura 8.4 Localização dos piezómetros e dos postos udométricos utilizados na modelação do escoamento.

8.2 Aquífero Moura-Brenhas

O Aquífero Moura-Brenhas tem uma constituição litológica muito semelhante à do aquífero principal, com algumas particularidades. Neste caso predominam os calcários dolomíticos e, secundariamente, alguns mármore calcíticos, que pertencem ao Complexo vulcano-sedimentar de Ficalho-Moura. Não existem evidências de que a Formação dolomítica do Câmbrio faça parte deste aquífero, pois sempre que esta formação foi intersectada nas sondagens ela fazia parte do aquífero principal (Moura-Ficalho).

Do ponto de vista geológico-estrutural, trata-se de uma dobra anticlinal secundária da estrutura anticlinal principal (Enfermarias-Castelo de Moura), provavelmente, separada desta por falhas de cavalgamento que originaram uma transição suficientemente argilizada para se tornar impermeável, assegurando uma diferença de potencial hidráulico de várias dezenas de metros na mesma vertical (sondagem SDSantoAntónio2, localizada no Outeiro de Santo António, a leste de Moura). Como se vê na Figura 8.5, chega a sobrepor-se ao aquífero principal.

O potencial hidráulico, na zona a leste de Moura, onde este é um aquífero cársico livre, ronda a cota +120 m (níveis observados de 1 de Outubro de 2000 a 31 Dezembro de 2005 a variar entre +122 m e +117 m), enquanto mais a norte, onde o aquífero é confinado e completamente oculto sob as coberturas terciária e aluvionar do Rio Ardila, apenas se sabe que será superior à cota do rio (> +88 m) (ver Figura 8.5), uma vez que alimenta a nascente da Defesa de S. Brás, que se escoia para este rio na sua margem direita.

A recarga deste aquífero, como se pretende representar na Figura 8.5, faz-se principalmente através da Ribeira de Brenhas que, nesta zona a leste de Moura, é influente em relação a este aquífero. O regime desta ribeira é, neste sector conhecido como Passadeiras de Brenhas, permanente, uma vez que o local se situa a jusante da linha de água permanente que escoia a nascente das Enfermarias que, como foi referido, constitui uma das descargas importantes identificadas do aquífero Moura-Ficalho.

A qualidade físico-química desta água também reflecte a origem da maior parte da recarga do sistema. São águas bicarbonatadas mistas cálcicas e magnesianas, com mineralizações geralmente elevadas em relação ao espaço percorrido subterraneamente neste aquífero (Resíduo seco 650 mg/l), com quantidades apreciáveis de iões cloreto e nitrato. Em geral atingem-se mineralizações superiores às do próprio Aquífero Moura-Ficalho, durante a estação seca. Em geral nota-se uma diminuição da mineralização na época das chuvas, devida à maior contribuição da água de escoamento superficial da Ribeira de Brenhas durante os episódios chuvosos, com o conseqüente efeito de diluição na qualidade da água de recarga. Os valores de nitratos observados neste aquífero variam entre 24 e 82 mg/l.

O número de captações deste pequeno aquífero não excederá uma dezena, dos quais um, situado na margem esquerda do Ardila, é repuxante.

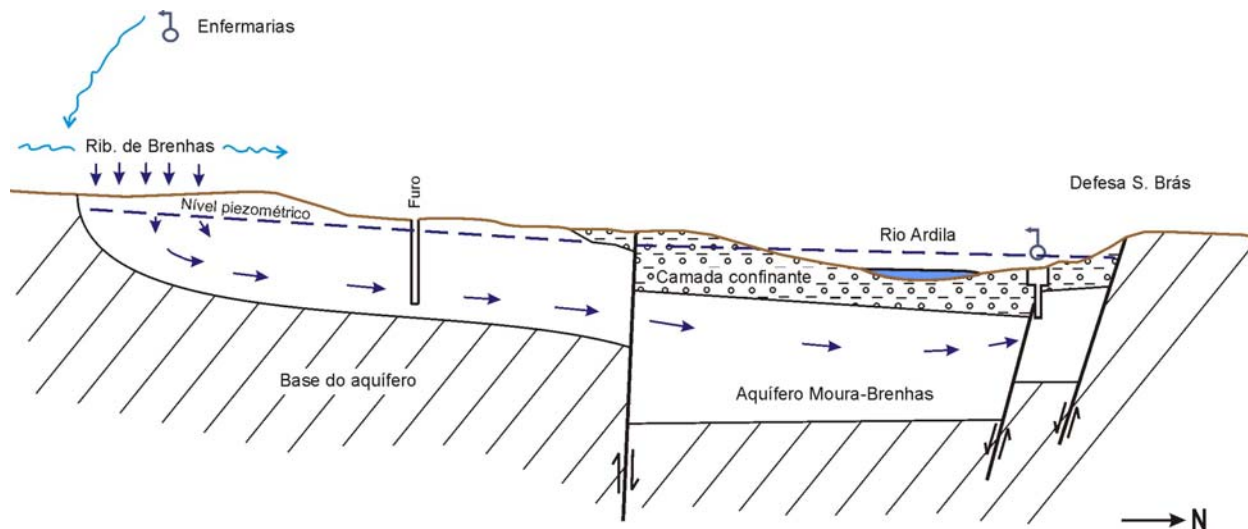


Figura 8.5 Perfil interpretativo do aquífero Moura-Brenhas

8.3 Aquífero dos «Calcários de Moura»

Trata-se de um aquífero superficial, mas confinado (Figura 8.1). A permeabilidade resulta das heterogeneidades texturais dos "Calcários de Moura" e da respectiva fracturação.

Os valores de transmissividade calculados através de ensaios de bombagem (Costa, 1992) e o inventário de pontos de água efectuado, denunciam valores baixos de condutividade hidráulica e uma elevada heterogeneidade do meio. Assim, o valor que se afigura admissível para o coeficiente de armazenamento é $8 \cdot 10^{-5}$, enquanto a transmissividade é bastante variável, mas geralmente inferior a $40 \text{ m}^2/\text{dia}$.

Neste enquadramento, é natural que as captações particulares que exploram este aquífero sejam pouco produtivas (geralmente inferiores a 2 l/s). No entanto, o facto de serem captações pouco profundas e de os correspondentes níveis piezométricos se situarem próximos da superfície, tornam este aquífero interessante para algumas indústrias, rega de pequenas hortas e abastecimento doméstico.

A recarga deste sistema faz-se, essencialmente, pela respectiva base, a partir do Aquífero Moura-Ficalho, subjacente em condições de confinamento (ver Figura 8.3).

A qualidade físico-química desta água é, no que respeita à potabilidade, relativamente má. Trata-se de águas bastante mineralizadas, chegando a ultrapassar 1 g/l de resíduo seco a 180°C . A predominância do ião bicarbonato nas águas medianamente mineralizadas do aquífero de Moura-

Ficalho é, em alguns pontos deste aquífero, substituída pela predominância do ião cloreto. Este incremento nos iões Cl^- e Na^+ pode ter duas origens:

- Mistura com águas resultantes da concentração de sais a partir de águas meteóricas infiltradas nos Calcários de Moura;
- Contaminação a partir de unidades industriais que utilizavam salmouras.

8.4 Aquífero da Ribeira da Toutalga

Este aquífero tem como suporte litológico a cobertura cenozoica que se desenvolve na zona de confluência das ribeiras de São Pedro e da Toutalga.

Do conjunto das captações do Monte do Matum, que captam este aquífero, foi possível observar fragmentos de "carotes" encontradas próximo destes, que indicam o atravessamento de uma cobertura terciária dominada pela existência de clastos, no seio de uma matriz e cimento de natureza carbonatada e/ou argilosa.

É um aquífero confinado, intimamente ligado à recarga proveniente das ribeiras da Toutalga e de S. Pedro.

A ribeira de S. Pedro, embora com uma bacia hidrográfica muito menor, tem um regime permanente, enquanto a ribeira da Toutalga é temporária. A situação descrita resulta do facto de a ribeira de S. Pedro receber a água da maior descarga natural do aquífero de Moura-Ficalho (nascente do Gargalão).

Esta ribeira torna-se desde logo influente nas cascalheiras aluvionares do seu leito, que por sua vez têm comunicação hidráulica com os materiais da cobertura cenozoica. As únicas descargas conhecidas, são três dos quatro furos do Monte do Matum, que debitam por artesianismo repuxante um caudal global de 1,5 l/s. Pensa-se que existem descargas naturais na Ribeira da Toutalga.

As semelhanças físico-químicas entre as águas destes furos e a água do Aquífero Moura-Ficalho, aliado à diferença de potenciais hidráulicos, respectivamente +170 m e +190 m, são concordantes com o modelo hidrogeológico sugerido.

O facto de haver maior variabilidade sazonal dos parâmetros físico-químicos da água, comparativamente ao aquífero Moura-Ficalho, deve estar relacionada com a dupla origem da recarga do aquífero, águas de origem meteórica e águas provenientes do aquífero Moura-Ficalho.

8.5 Outras formações aquíferas

As rochas xistosas envolventes das formações carbonatadas do socal varisco, de uma forma geral no Alentejo, revelam um incremento de produtividade aquífera nas vizinhanças dessas formações carbonatadas.

Na presente área de estudo também se identificaram situações deste tipo que correspondem a

transferências hídricas subterrâneas do aquífero Moura-Ficalho para as formações envolventes. No caso de este contacto se dar com formações de cobertura de natureza detrítica, é expectável que essas transferências hídricas sejam mais importantes, como parece suceder em relação à cobertura terciária que se desenvolve a oeste e sudoeste da cidade de Moura. Esta é explorada através de um número elevado de furos de captação, geralmente pouco profundos, que devem captar algumas dessas "infiltrações subterrâneas" de água proveniente do aquífero Moura-Ficalho.

A concessão hidromineral de Pisões-Moura, com as particularidades hidrogeoquímicas que caracterizam o perfil desta água, também parece ter origem neste tipo de transferências hídricas, ao nível da sub-bacia do Ribeiro de Torejais, entre o aquífero Moura-Ficalho e a cobertura terciária.

Também na zona do Monte de Palhais, a nordeste da serra de Ficalho já fora da área do aquífero principal, uma campanha de sondagens mecânicas realizada por um particular intersectou níveis aquíferos, embora de baixa produtividade, pelo que algumas não foram aproveitadas.

Igualmente na zona nordeste da serra da Preguiça, foram identificados poços em que, o quimismo das respectivas águas sugere que estes devem estar a ser abastecidos, indirectamente, pelo aquífero principal.

Como se verá no modelo numérico de fluxo houve necessidade de considerar fronteiras do tipo dreno nestes limites do aquífero Moura-Ficalho.

ÍNDICE do Capítulo 8

8	SISTEMA AQUÍFERO MOURA-FICALHO	49
8.1	Aquífero Moura-Ficalho	49
8.2	Aquífero Moura-Brenhas	61
8.3	Aquífero dos «Calcários de Moura»	62
8.4	Aquífero da Ribeira da Toutalga	63
8.5	Outras formações aquíferas	63

ÍNDICE Figuras

Figura 8.1	Sistema Aquífero Moura-Ficalho.....	51
Figura 8.2	Modelo conceptual da geometria tridimensional do aquífero Moura-Ficalho, considerando duas camadas, a verde e a azul. Em tom amarelado representa-se a camada confinante.....	53
Figura 8.3	Bloco diagrama simplificado do aquífero Moura-Ficalho	55
Figura 8.4	Localização dos piezómetros e dos postos udométricos utilizados na modelação do escoamento.	59
Figura 8.5	Perfil interpretativo do aquífero Moura-Brenhas.....	62

9 RECARGA DO AQUÍFERO MOURA-FICALHO

Para se desenvolver um modelo de escoamento é fundamental quantificar a recarga. Trata-se de um parâmetro que não é facilmente mensurável, ao contrário da precipitação. Por simplificação, é habitual quantificar a recarga admitindo que esta é uma percentagem da precipitação.

Depois de uma tentativa de estimativa de recarga com uma técnica de traçadores químicos, que se revelou inadequada nesta situação concreta, foi utilizado um modelo que simula os processos que ocorrem acima da zona saturada, utilizando o nível piezométrico como critério de calibração do modelo.

9.1 Traçadores químicos

A recarga aquífera pode ser estimada a partir de traçadores químicos, como o ião cloreto, que são produzidos naturalmente na atmosfera terrestre. O ião cloreto tem a vantagem de ser facilmente mensurável e de ser, normalmente, um ião estável na água subterrânea.

A concentração de cloreto no solo até à profundidade radicular da vegetação dominante, aumenta em resultado da evapotranspiração. Para profundidades superiores, permanece aproximadamente constante, podendo ser usado como traçador químico. Segundo Custódio e Llamas (1996), em determinadas condições, é possível estimar a recarga de um aquífero a partir do valor das concentrações em cloreto da água da chuva e de amostras de água do aquífero através do balanço de massa do ião cloreto. Este balanço pode fazer-se através de uma equação simplificada (Equação 9.1), assumindo que se trata de um elemento conservativo e que não existem fontes anómalas, naturais ou antrópicas de cloreto.

Equação 9.1

$$I_e = \frac{I}{P} = \frac{C_p}{C_i}$$

em que:

I_e - infiltração eficaz ou recarga

I – água de infiltração profunda (mm)

P – precipitação média anual (mm)

C_p – concentração em cloreto na água de precipitação

C_i - concentração em cloreto na água de infiltração profunda

Recolheram-se amostras de água da chuva em Abril e em Novembro de 1997, respectivamente, no interior do castelo de Moura e junto ao Outeiro de Santo António (cerca de 1.5 quilómetros para nascente). Ambas as amostras foram recolhidas com procedimentos semelhantes, isto é, o

dispositivo de recolha apenas foi montado depois de se ter iniciado um episódio chuvoso intenso e de todo o material ter sido enxaguado com a própria água da chuva. Logo que o recipiente ficou cheio, o frasco foi devidamente rolhado.

Apesar dos cuidados referidos, a concentração em ião cloreto encontrada em cada uma das amostras, veio confirmar uma situação já anteriormente identificada na região do Alentejo, que é existência de uma enorme disparidade de valores. Nas amostras antes referidas, os valores encontrados foram os seguintes:

- Amostra de Abril de 1997, $Cl^- = 0,36$ mg/l;
- Amostra de Novembro de 1997, $Cl^- = 5,65$ mg/l.

Em Setembro de 2004, fez-se uma campanha de amostragem de águas para análise físico-química resumida (inclui os catiões e aniões maioritários com fecho de balanço iónico, além do resíduo seco e da sílica) (Costa *et al.*, 2006a) e, mesmo considerando o valor mínimo de cloretos das 69 amostras de água do aquífero Moura-Ficalho (21,21 mg/l), a aplicação da técnica de balanço de cloretos, como se referiu, conduz a avaliações de recarga que se consideram claramente inaceitáveis face à realidade em presença. Assim temos:

- a recarga de 1,7% da precipitação, considerando a concentração em cloretos de Abril;
- a recarga de 26,6% da precipitação, considerando a concentração em cloretos de Novembro.

De facto se a concentração em cloretos na água da chuva apresenta uma dispersão de valores como a que se detectou, o método não se pode aplicar. Provavelmente, outras estimativas que se têm apresentado com base no balanço de cloretos, pelo menos na região do Alentejo, poderiam ser outras, bem diferentes, se a amostra de água da chuva correspondesse a outro episódio chuvoso.

9.2 Estimativa da recarga com o modelo EARTH

No âmbito da colaboração existente entre o INETI e o ITC, desenvolveu-se um estudo de avaliação da recarga do aquífero Moura-Ficalho utilizando o modelo EARTH.

O INETI participou, quer na disponibilização e tratamento de dados climatológicos e hidrogeológicos, quer na apresentação no terreno do modelo conceptual de funcionamento do Sistema Aquífero. Do relatório produzido, intitulado Recharge Estimate In Moura-Ficalho Aquifer: Using EARTH Model, da autoria de Chomba (2004), descreve-se sumariamente a metodologia seguida e os resultados principais obtidos.

EARTH é o acrónimo de Extended model for Aquifer Recharge and soil moisture Transport through the unsaturated Hardrock e foi desenvolvido em 1989 por J. van der Lee, J. C. Gehrels e A. Gieske para aplicação em condições climáticas áridas e semi-áridas. O modelo já foi aplicado, não só em

condições áridas (Gieske, 2003), como numa zona central da Holanda. Nestas condições, de clima húmido, os resultados foram comparados com os de outro modelo de estimação da recarga, o SWAP (van Dam *et al*, 1997), com resultados consistentes (Gehrels, 1999).

Na Figura 9.1 apresenta-se o fluxograma do modelo, com indicação dos vários módulos que o compõem e dos principais processos hidrológicos envolvidos.

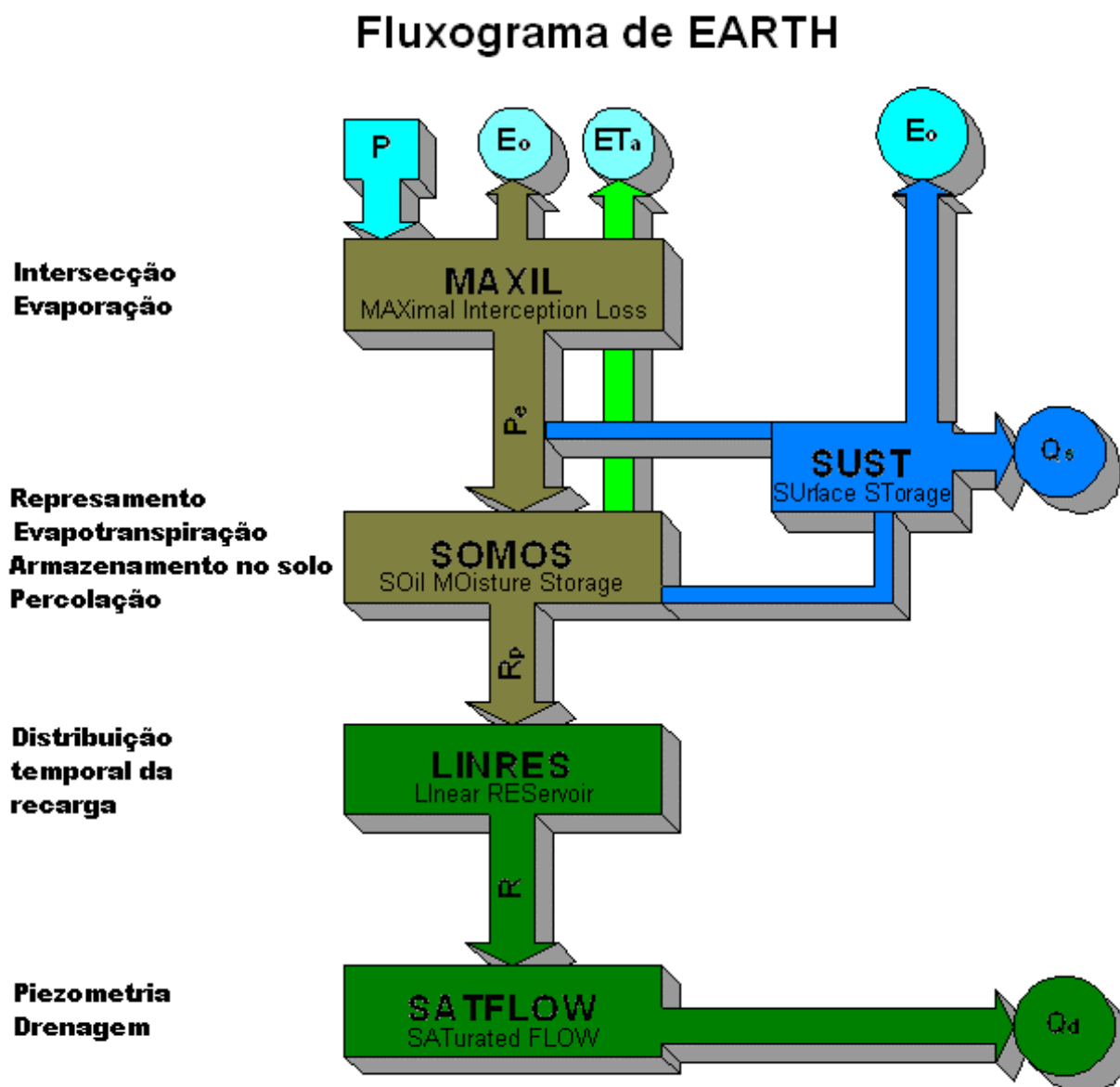


Figura 9.1 Fluxograma do modelo EARTH (adaptado de van der Lee (1990) in Chomba, 2004)

Trata-se de um modelo unidimensional, com um incremento de tempo diário, em que se simula a circulação da água de precipitação até à zona saturada. Considerando a respectiva capacidade de

armazenamento e uma constante de recessão saturada (que serve para simular a descida de níveis após um episódio de recarga) gera-se uma curva piezométrica, com base na quantidade de água que atravessou toda a zona não saturada e atinge o aquífero. O modelo faz o balanço da água ao nível do solo, considerando equações semi-empíricas para simular os vários processos intervenientes. A calibração do modelo faz-se por comparação entre as curvas piezométricas simulada e observada.

9.2.1 Cálculo da Evapotranspiração Potencial Diária

Um dos dados a introduzir neste modelo é a evapotranspiração potencial (ETP) diária, para o que foi necessário utilizar informação climatológica de estações da região.

As estações consideradas e respectivas áreas de influência estão representadas na Figura 9.2.

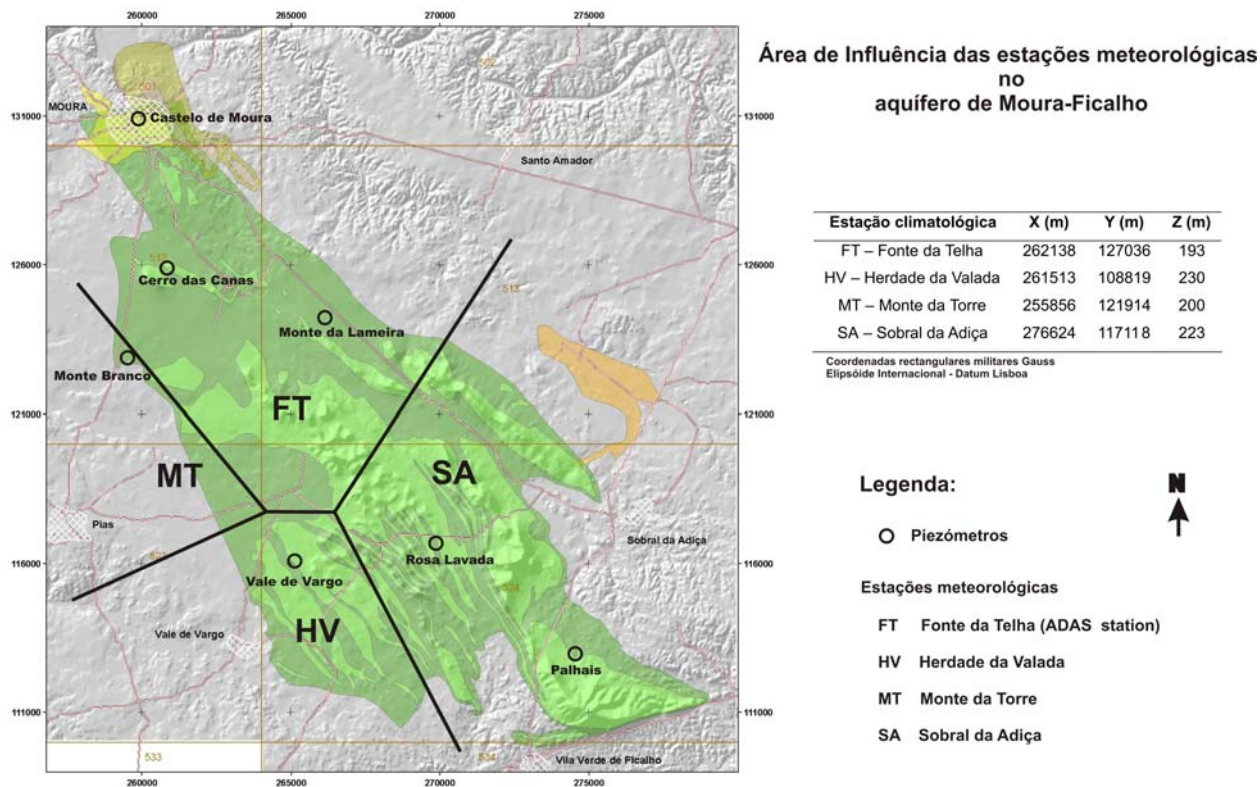


Figura 9.2 Áreas de influência das estações climatológicas consideradas.

Os dados das estações Herdade da Valada, Monte da Torre e Sobral da Adiça foram obtidos a partir do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH). A estação Fonte da Telha (ADAS station) foi instalada e mantida pelo ITC (Dr. M. W. Lubczynski) com a colaboração do INETI (Dr. Alain Francés). A cobertura temporal dos dados disponíveis das estações consideradas está representada na (Figura 9.3).

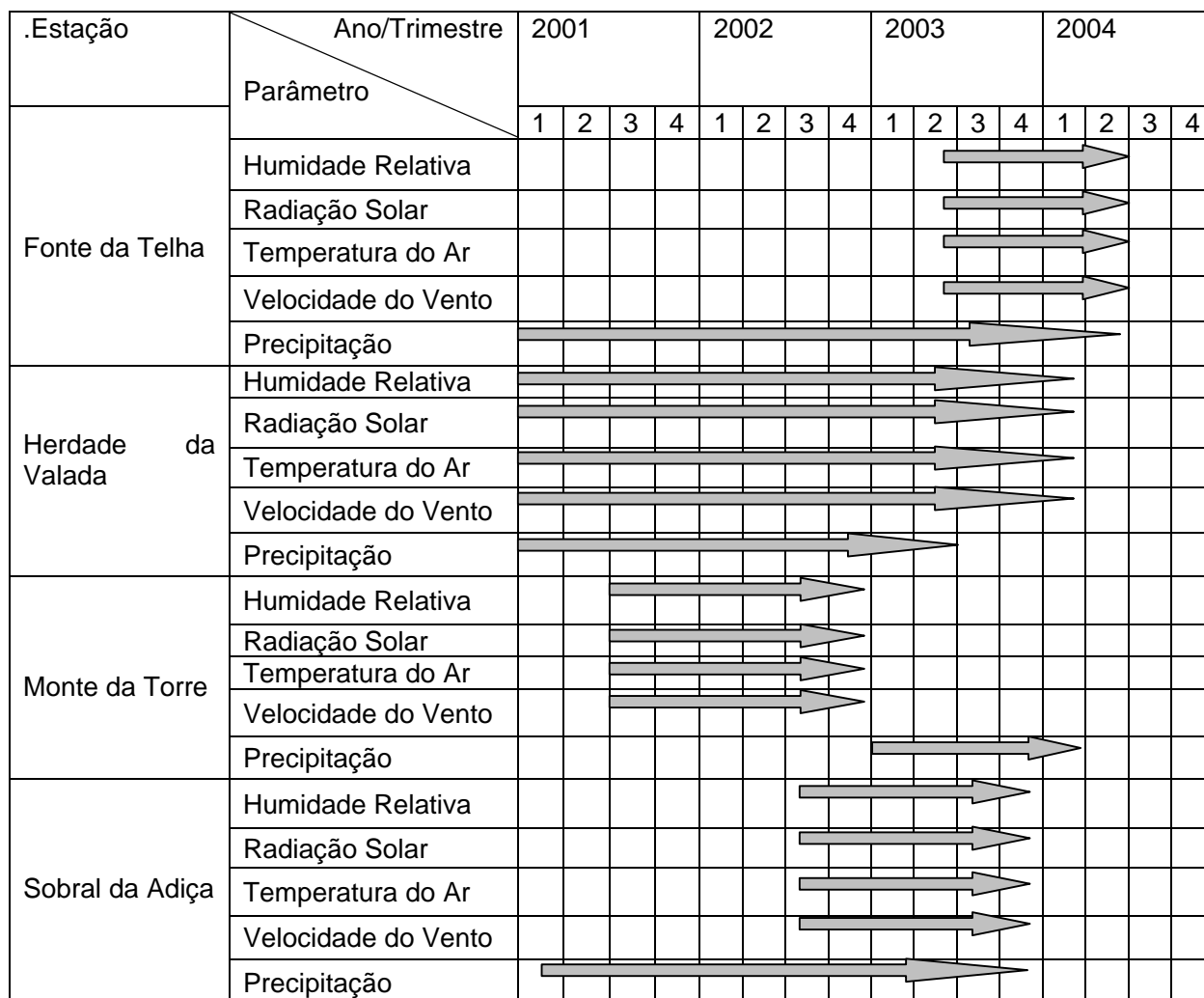


Figura 9.3 Distribuição temporal dos vários parâmetros climatológicos nas estações da região (adaptado de Chomba, 2004)

Foram utilizadas equações de regressão linear dos totais mensais acumulados da precipitação para completar dados diários em falta.

A falta de dados da estação de Sobral da Adiça para o cálculo da evapotranspiração potencial foi ultrapassada através de regressão linear com a estação de Herdade da Valada. O índice de correlação entre as duas estações é alto (84,7%), o que faz com que seja aceitável a técnica utilizada, sobretudo por a estação de Sobral da Adiça ter muita informação de precipitação.

Utilizou-se o programa AWSET (Cranfield-University, 1999) para calcular a evapotranspiração potencial pelo método de Penman-Monteith, a partir dos dados de Humidade Relativa (%), Radiação Solar ($W \cdot m^{-2}$) ou Horas de sol (Horas), Temperatura do Ar ($^{\circ}C$) e Velocidade do Vento ($m \cdot s^{-1}$). Além destes dados, foram introduzidos no programa as coordenadas, a altitude e o fuso horário de cada estação.

A equação de Penman-Monteith, em que se baseia este método é a seguinte:

Equação 9.2

$$ETP = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

em que:

ETP	Evapotranspiração Potential (mm dia ⁻¹)
R_n	Radiação total líquida (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
G	Fluxo de calor recebido pelo solo (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
T	temperatura média diária (°C)
u_2	Velocidade do vento a 2 m de altura [m s ⁻¹]
e_a	Tensão de vapor de água (kPa)
e_s	Tensão de saturação de vapor de água (kPa)
$e_s - e_a$	Défice de tensão de saturação (kPa)
Δ	Derivada da função de tensão de vapor em ordem à temperatura (kPa °C ⁻¹)
γ	Constante psicométrica (kPa °C ⁻¹)

Os valores de ETP encontrados para cada estação meteorológica, são maiores na estação quente e seca e menores no período mais frio e húmido, variando entre 0,5 mm-dia⁻¹ e 6,0 mm-dia⁻¹, nas estações Herdade da Valada e Monte da Torre, sendo os valores de Sobral da Adiça maiores (entre 1,0 mm-dia⁻¹ e 10,0 mm-dia⁻¹), mas com o mesmo tipo de variação ao longo do ano.

9.2.2 Calibração e análise de sensibilidade

Desenvolveram-se modelos de recarga para cinco dos piezómetros disponíveis: Cerro das Canas, Lameira, Palhais, Rosa da Lavada e Vale de Vargo (ver localização na Figura 9.2).

Não foram utilizadas técnicas de modelação inversa na optimização da calibração, mas o ajustamento manual alcançado é bom, não se excedendo 1 metro de diferença entre valores simulados e observados, excepto no que respeita aos piezómetros Rosa da Lavada e Vale de Vargo, onde, de qualquer forma, menos de 1% dos valores simulados se situa acima deste erro.

As curvas piezométricas simuladas e observadas constam do relatório antes referido (Chomba, 2004), de onde se retiraram os dados relativos aos valores paramétricos de cada um dos modelos, bem como os respectivos valores máximo e mínimo, resultante da análise de sensibilidade realizada (Tabela 9.1, Tabela 9.2, Tabela 9.3, Tabela 9.4 e Tabela 9.5).

Da observação destas tabelas destaca-se o facto de a condutividade saturada apresentar valores elevados e uma baixa ou nula sensibilidade para valores superiores aos utilizados, o que denuncia a presença de condutas cársicas que intervêm no processo de recarga (Fetter, 2001).

Tabela 9.1 – Valores paramétricos relativos ao piezómetro Cerro das Canas.

Cerro das Canas

Parâmetro	Unidades	Módulo	Valores simulados	Limites admissíveis segundo a análise de sensibilidade	
				Inferior	Superior
Humidade do solo máxima	mm	SOMOS	320	280	370
Humidade do solo residual	mm		150	140	155
Humidade do solo inicial	mm		195	160	210
Humidade do solo na capacidade de campo	mm		200	195	208
Condutividade saturada	mm dia ⁻¹		2500	30	Não sensível
Arnazenamento superficial máximo	mm	SUST	150	Sem limites	
Perda por intersecção máxima	mm	MAXIL	0,45	0,25	0,7
Constante de recessão não saturada	dias	LINRES	4	3	8
N.º de reservatórios	N.º		1	1	1
Constante de recessão saturada	Dias	SATFLOW	152	140	220
Coefficiente de armazenamento	-		0,062	0,058	0,065

Tabela 9.2 – Valores paramétricos relativos ao piezómetro Lameira 2.

Lameira

Parâmetro	Unidades	Módulo	Valores simulados	Limites admissíveis segundo a análise de sensibilidade	
				Inferior	Superior
Humidade do solo máxima	mm	SOMOS	350	320	450
Humidade do solo residual	mm		140	137	142
Humidade do solo inicial	mm		220	180	225
Humidade do solo na capacidade de campo	mm		195	193	196
Condutividade saturada	mm dia ⁻¹		2500	700	?
Arnazenamento superficial máximo	mm	SUST	150	Sem limites	
Perda por intersecção máxima	mm	MAXIL	0,8	0,7	1
Constante de recessão não saturada	dias	LINRES	20	20	20
N.º de reservatórios	N.º		1	1	1
Constante de recessão saturada	Dias	SATFLOW	70	68	75
Coefficiente de armazenamento	-		0,035	0,035	0,035

Tabela 9.3 – Valores paramétricos relativos ao piezómetro Palhais.

Palhais

Parâmetro	Unidades	Módulo	Valores simulados	Limites admissíveis segundo a análise de sensibilidade	
				Inferior	Superior
Humidade do solo máxima	mm	SOMOS	600	540	610
Humidade do solo residual	mm		110	110	160
Humidade do solo inicial	mm		580	595	575
Humidade do solo na capacidade de campo	mm		280	300	275
Condutividade saturada	mm dia ⁻¹		3500	200	Não sensível
Arnazenamento superficial máximo	mm	SUST	100	Não sensível	
Perda por intersecção máxima	mm	MAXIL	0,8	0,7	1
Constante de recessão não saturada	dias	LINRES	15	17	19
N.º de reservatórios	N.º		2	2	2
Constante de recessão saturada	Dias	SATFLOW	105	100	112
Coeficiente de armazenamento	-		0,042	0,041	0,043

Tabela 9.4 – Valores paramétricos relativos ao piezómetro Rosa da Lavada.

Rosa da Lavada

Parâmetro	Unidades	Módulo	Valores simulados	Limites admissíveis segundo a análise de sensibilidade	
				Inferior	Superior
Humidade do solo máxima	mm	SOMOS	610	500	720
Humidade do solo residual	mm		140	110	160
Humidade do solo inicial	mm		545	535	555
Humidade do solo na capacidade de campo	mm		305	320	390
Condutividade saturada	mm dia ⁻¹		3000	100	20000000
Arnazenamento superficial máximo	mm	SUST	150	Não sensível	
Perda por intersecção máxima	mm	MAXIL	0,45	0,35	0,5
Constante de recessão não saturada	dias	LINRES	30	30	30
N.º de reservatórios	N.º		2	2	2
Constante de recessão saturada	Dias	SATFLOW	140	130	145
Coeficiente de armazenamento	-		0,055	0,055	0,055

Tabela 9.5 – Valores paramétricos relativos ao piezómetro Vale de Vargo.

Vale de Vargo

Parâmetro	Unidades	Módulo	Valores simulados	Limites admissíveis segundo a análise de sensibilidade	
				Inferior	Superior
Humidade do solo máxima	mm	SOMOS	500	420	600
Humidade do solo residual	mm		150	110	180
Humidade do solo inicial	mm		420	335	470
Humidade do solo na capacidade de campo	mm		250	200	310
Condutividade saturada	mm dia ⁻¹		2500	100	15000000
Arnazenamento superficial máximo	mm	SUST	150	Não sensível	
Perda por intersecção máxima	mm	MAXIL	0,4	0,3	0,5
Constante de recessão não saturada	dias	LINRES	25	25	25
N.º de reservatórios	N.º		2	2	2
Constante de recessão saturada	Dias	SATFLOW	110	100	125
Coefficiente de armazenamento	-		0,04	0,04	0,04

9.2.3 Valores de recarga

As taxas de recarga estimadas com o modelo *EARTH* e os valores dos parâmetros de modelação utilizados constam na Tabela 9.6. Além dos valores calculados por Chomba em 2004 (colunas A), Incluiu-se ainda nesta tabela, para cada piezómetro, uma coluna (coluna B) com os resultados preliminares a que chegou Alain Francés em trabalhos posteriores (informação pessoal).

Como se pode constatar as diferenças encontradas nas taxas de recarga são significativas e justificam os trabalhos em curso neste domínio, nesta região. Contudo deve notar-se que foram considerados diferentes intervalos de tempo e dados de uma nova estação climatológica entretanto instalada na serra da Adiça (Monte do Álamo) a uma cota bastante superior à das restantes estações.

No presente trabalho adoptou-se uma taxa de recarga de 38%, depois de se ter reduzido um valor inicial de 40 e 45%, por se revelarem excessivos os valores inicialmente adoptados.

É claro que a adopção de uma taxa de infiltração eficaz baseada na precipitação já é uma simplificação grande. Em futuros trabalhos haverá que re-calibrar o modelo que agora se apresenta, com base nos valores de recarga efectivamente calculados, espacial e temporalmente distribuídos. A importância desta análise espacio-temporal da recarga foi evidenciada noutros trabalhos (Cook, *et al.*, 1998, Beverly, *et al.*, 1999, Lubczynski e Gurwin, 2005). A dispersão de taxas de recarga que consta da Tabela 9.6, é reveladora dessa importância.

O desenvolvimento futuro dos trabalhos, com a intensificação da recarga natural e recarga artificial, da forma que se sugere no final da presente tese, constituirá uma excelente oportunidade para refinar os conhecimentos actuais sobre o tema.

Tabela 9.6 – Valores considerados por Chomba (coluna A) e por Alain Francés (coluna B) nos modelos EARTH.

Parâmetros EARTH	Unidades	CC		LA		PA		RL		VV	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Humidade do solo máxima	mm	320	600	350	450	600	440	610	475	500	400
Humidade do solo residual	mm	150	150	140	100	110	25	140	100	150	115
Humidade do solo inicial	mm	195	150	220	100	580	300	545	150	420	150
Humidade do solo na capacidade de campo	mm	200	390	195	320	280	400	305	410	250	355
Condutividade saturada	mm dia ⁻¹	2500	750	2500	750	3500	750	3000	750	2500	750
Armazenamento superficial máximo	mm	150	100	150	100	100	100	150	100	150	100
Perda por intersecção máxima	mm	0,45	0,25	0,8	0,25	0,8	0,25	0,45	0,25	0,4	0,25
Constante de recessão não saturada	dias	4	5	20	50	15	13	30	7,5	25	22,5
N.º de reservatórios	N.º	1	1	1	1	2	1	2	1	2	2
Constante de recessão saturada	Dias	152	275	70	300	105	450	140	600	110	450
Coefficiente de armazenamento	-	0,062	0,05	0,035	0,035	0,042	0,03	0,055	0,04	0,04	0,035
Recarga (% da precipitação)	-	37,8	24,72	47,3	25,34	42,4	18,26	43,7	19,70	44,7	16,99

ÍNDICE

9	RECARGA DO AQUÍFERO MOURA-FICALHO	65
9.1	Traçadores químicos	65
9.2	Estimativa da recarga com o modelo EARTH	66
9.2.1	Cálculo da Evapotranspiração Potencial Diária	68
9.2.2	Calibração e análise de sensibilidade	70
9.2.3	Valores de recarga.....	73
Figura 9.1	Fluxograma do modelo EARTH (adaptado de van der Lee (1990) in Chomba, 2004)	67
Figura 9.2	Áreas de influência das estações climatológicas consideradas.	68
Figura 9.3	Distribuição temporal dos vários parâmetros climatológicos nas estações da região (adaptado de Chomba, 2004)	69
Tabela 9.1	– Valores paramétricos relativos ao piezómetro Cerro das Canas.....	71
Tabela 9.2	– Valores paramétricos relativos ao piezómetro Lameira 2.	71
Tabela 9.3	– Valores paramétricos relativos ao piezómetro Palhais.	72
Tabela 9.4	– Valores paramétricos relativos ao piezómetro Rosa da Lavada.....	72
Tabela 9.5	– Valores paramétricos relativos ao piezómetro Vale de Vargo.	73
Tabela 9.6	– Valores considerados por Chomba (coluna A) e por Alain Francés (coluna B) nos modelos EARTH.....	74

10 HIDROGEOQUÍMICA

10.1 Caracterização hidroquímica do Sistema Aquífero Moura-Ficalho

Este capítulo aborda questões hidrogeoquímicas apenas na perspectiva do respectivo contributo para o modelo conceptual de funcionamento hidráulico do Sistema Aquífero Moura-Ficalho. Outros trabalhos mais específicos e exaustivos sobre o tema já foram anteriormente publicados (Costa, 2001, Costa *et al.*, 2006a).

O sistema aquífero possui, desde 1997, uma rede de monitorização da qualidade formada por 13 pontos (Figura 10.1) equipada no âmbito do projecto ERHSA, que tem permitido efectuar a análise de evolução temporal dos iões maioritários. Algumas captações foram construídas no âmbito do referido projecto, para a monitorização piezométrica e de qualidade, sendo também integrados alguns furos particulares e de abastecimento público. O piezómetro SH Santo António 2 capta o aquífero de Moura Brenhas e o piezómetro SH Moura 2 o aquífero dos Calcários de Moura; o piezómetro Lameira 2 capta a cobertura cenozóica enquanto o piezómetro Lameira 1, adjacente, capta o aquífero Moura Ficalho, permitindo estudar as relações hidráulicas e hidroquímicas entre os dois. Os restantes furos captam o aquífero de Moura-Ficalho.

No âmbito do Projecto HIDROPARK fez-se, em Setembro de 2004, uma amostragem para a análise físico-química de iões maiores em 73 pontos de água (furos, poços e nascentes), dos quais 68 pontos foram sujeitos à pesquisa de metais pesados e elementos vestigiais. Foi também efectuada a pesquisa de hidrocarbonetos em 11 pontos de água, que se localizam em áreas susceptíveis de serem afectadas por este tipo de contaminante, como sejam as áreas envolventes das estações de serviço ou de furos com gerador próximo.

As considerações que se passam a apresentar baseiam-se sobretudo no trabalho *Estudo Hidrogeoquímico do Sistema Aquífero Moura-Ficalho* (Costa *et al.*, 2006a).

Assim, a água deste sistema aquífero tem pH muito próximo de 7, quase sempre entre 6,5 e 7,5, fácies bicarbonatada cálcica ou cálcico-magnésiana, medianamente a muito mineralizadas, geralmente sobresaturadas ou saturadas em relação à calcite e à dolomite.

Os aquíferos deste sistema apresentam as seguintes características hidroquímicas:

- O Aquífero Moura-Ficalho, é caracterizado por águas em que são predominantes os iões HCO_3^- e Ca^{2+} e/ou Mg^{2+} . Uma vez que são águas que têm uma mineralização relativamente elevada (resíduo seco a 180° C de cerca de 550 mg/L), trata-se de águas duras (40-47 °F);

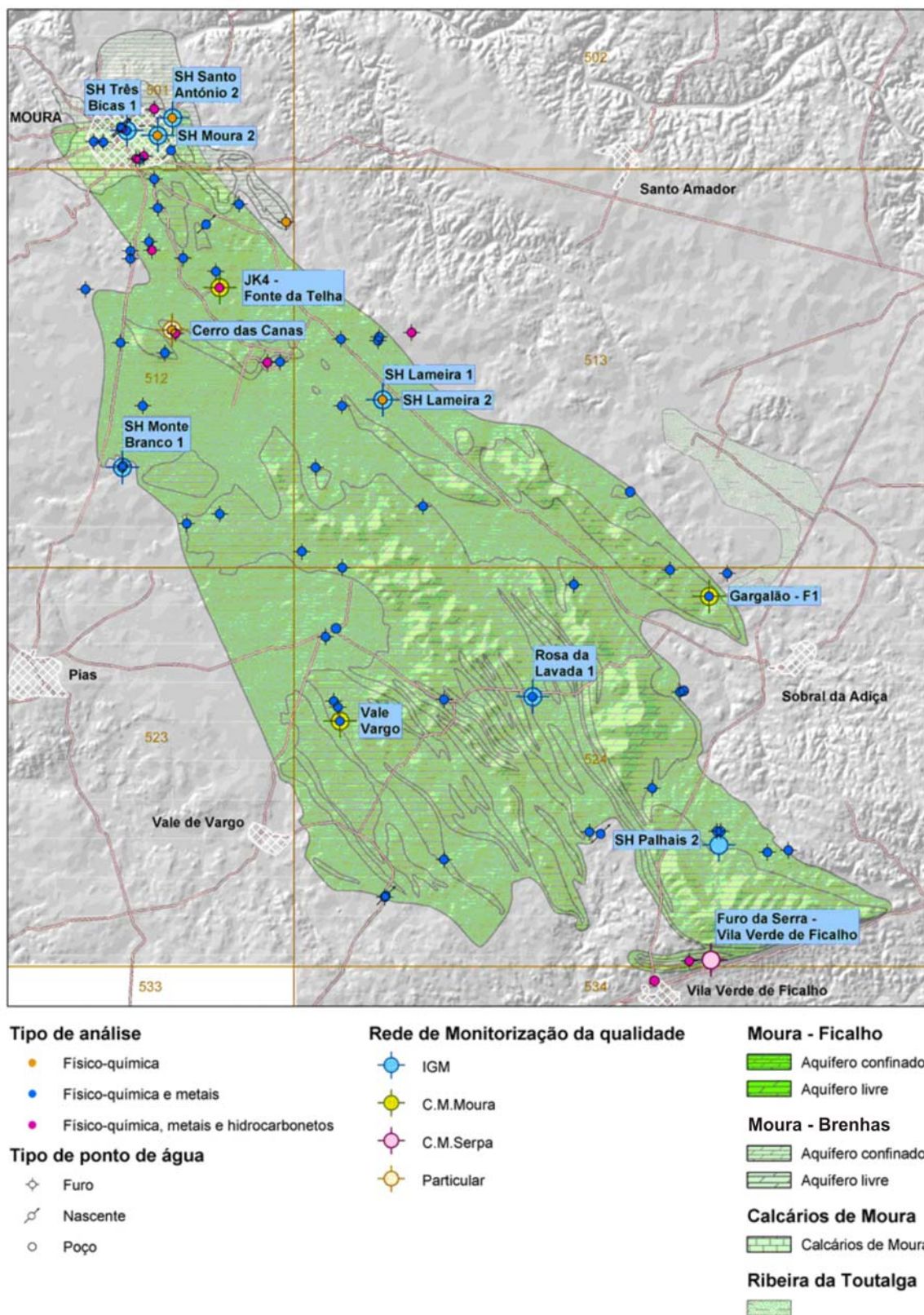


Figura 10.1 - Rede de monitorização da qualidade e pontos de água amostrados em Setembro de 2006.

- O Aquífero Moura-Brenhas, é caracterizado por águas bicarbonatadas mistas cálcico-magnesianas, com uma mineralização total relativamente elevada. São também águas duras (cerca de 41 ° F);
- O Aquífero dos «Calcários de Moura», é caracterizado por águas com maior mineralização do que nos dois aquíferos anteriores, chegando o resíduo seco a 180° C, a ultrapassar 1 g/l, em alguns pontos de água do aquífero. Este incremento de mineralização, que não é generalizado mas que se observa em diversos pontos de água, resulta de um aumento significativo do Cl^- e do Na^+ , pelo menos em parte, por contaminação doméstica e da indústria de conservas.
- O Aquífero da Ribeira da Toutalga, é caracterizado por uma variação sazonal de quimismo que denuncia o respectivo processo de recarga e as relações hidráulicas com o aquífero principal. Efectivamente, durante a estiagem (em que o aquífero é recarregado pela influência da Ribeira de S. Pedro, que é, um pouco a montante, efluente em relação ao aquífero Moura-Ficalho – nascente de Gargalão), as características químicas da água dos furos repuxantes de Monte Matum são muito semelhantes às da nascente de Gargalão; durante o período das chuvas, em que a Ribeira da Toutalga acrescenta ao escoamento subterrâneo proveniente da Ribeira de S. Pedro, o escoamento superficial das ribeiras de S. Pedro e da Toutalga, a mineralização total e a concentração em HCO_3^- e Ca^{2+} , da água dos furos deste aquífero diminuem, reflectindo a influência do escoamento superficial na recarga deste aquífero.

No perímetro urbano de Moura a influência antropogénica é importante como factor modificador das características físico-químicas da água subterrânea, em particular nas águas de circulação menos profunda, nomeadamente no que respeita aos iões Cl^- e Na^+ , como já foi referido. Nota-se ainda um incremento da concentração no ião nitrato, particularmente acentuado em zona de agricultura mais intensiva (zonas de Herdade dos Machados e Cerro das Canas).

Na Tabela 10.1 apresentam-se os valores dos estatísticos básicos principais das colheitas efectuadas na rede de monitorização de qualidade entre Março de 1997 e Maio 2005.

O piezómetro Lameira 2 possui fácies cloretada sódica, devido ao facto de captar as formações detríticas cenozóicas. Em Monte Branco 1 registaram-se maiores variações de fácies, devido às conexões hidráulicas entre o aquífero e o Barranco da Parreira situado nas proximidades.

Tabela 10.1 - Estatísticos básicos principais das amostragens entre Março de 1997 e Maio 2005

Parâmetros	n	Mínimo	q1	Média	Mediana	q3	Máximo	Desv. Padrão	Variância
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	253	356.0	728.0	911.9	825.0	936.0	2740.0	412.1	169798.5
pH	269	6.9	7.2	7.4	7.3	7.5	9.3	0.3	0.1
Dureza Total ($\text{mg}/\text{l CaCO}_3$)	270	11.8	370.7	381.5	406.8	460.8	708.0	131.7	17334.2
Resíduo Seco ($\text{mg}/\text{l CaCO}_3$)	270	226.8	479.5	605.1	548.3	619.2	1858.6	289.3	83695.3
HCO_3^- (mg/l)	270	23.2	382.6	400.5	420.6	439.8	597.8	110.9	12308.8
Ca^{2+} (mg/l)	270	19.4	98.4	104.9	104.3	118.1	197.4	25.8	666.2
Na^+ (mg/l)	270	12.7	26.0	59.6	40.0	52.9	415.0	76.2	5801.3
K^+ (mg/l)	270	0.4	1.2	4.4	2.2	4.5	27.0	6.1	37.7
Mg^{2+} (mg/l)	270	0.7	28.5	35.1	37.0	41.3	61.7	11.5	132.9
NO_3^- (mg/l)	270	0.0	17.2	30.4	27.1	35.0	157.6	24.6	604.8
F^- (mg/l)	263	0.0	0.4	0.7	0.6	0.8	6.1	0.6	0.4
Cl^- (mg/l)	270	13.8	53.6	114.5	88.8	124.7	630.2	114.9	13204.1
SO_4^{2-} (mg/l)	270	0.6	20.6	39.2	27.4	35.8	220.6	44.2	1953.8

10.2 Evolução hidroquímica

Fez-se uma análise da evolução temporal dos diferentes parâmetros hidroquímicos, em particular os que podem relacionar-se com as práticas agrícolas. Na análise temporal, foram utilizadas 270 análises físico-químicas, colhidas entre Março de 1997 e Maio de 2005, nas 13 captações da rede de monitorização.

A captação Lameira 2 (cobertura cenozóica) destaca-se do conjunto pela condutividade eléctrica alta (mediana de 2210 $\mu\text{S}/\text{cm}$), devido aos valores elevados em cálcio (mediana de 140 mg/L), sódio (mediana de 300 mg/L), cloreto (mediana de 447 mg/L) e sulfato (mediana de 186 mg/L). Observa-se também um aumento na mineralização em período de chuva mais intenso, devido ao incremento da lixiviação destes depósitos. A captação de Monte Branco apresenta também particularidades, como uma grande variabilidade no pH (entre 7,1 e 9,3) e valores da condutividade eléctrica (mediana de 472 $\mu\text{S}/\text{cm}$), de bicarbonato (mediana de 43,9 mg/L) de magnésio (mediana de 6,7 mg/L) e de cálcio (mediana de 38,7 mg/L) mais baixos em relação às outras captações. Este facto pode ser explicado pela existência de um poço próximo que foi inundado diversas vezes no ano hidrológico 2001/02. De facto, entre Janeiro de 2001 e Julho de 2002 verificou-se uma diminuição do pH e do nitrato e, conseqüentemente, um aumento do bicarbonato, cálcio, magnésio e da condutividade eléctrica.

As restantes captações mostram resultados mais homogéneos e estáveis ao longo do tempo. Os valores medianos da condutividade eléctrica situam-se em cerca de 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na zona de recarga, aumentando para cerca de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nas zonas terminais (Castelo, Gargalão). O pH varia entre 7

e 7,5, os valores medianos de concentrações iónicas rondam os 400 mg/L para o bicarbonato, 100 mg/L para o cálcio, 40 mg/L para o magnésio, e variam entre 20 e 50 mg/L para o sódio e entre 40 e 130 mg/L para o cloreto.

A captação de Moura 2, apesar de se encontrar nos “Calcários de Moura”, apresenta valores também semelhantes aos do aquífero principal. Este facto é devido às conexões hidráulicas existentes entre estes dois aquíferos, como foi anteriormente referido no capítulo 8. O aquífero dos “Calcários de Moura” apresenta, no entanto, mineralizações elevadas em outros pontos de água (nomeadamente na chamada Bica do Leão) devido às heterogeneidades litológicas destes depósitos cenozóicos.

O nitrato apresenta uma clara sazonalidade nas captações Lameira 1 (mínimo de 6,4 e máximo de 40,6 mg/L), Lameira 2 (mínimo de 26,5 e máximo de 77,1 mg/L), Fonte da Telha (mínimo de 18,4 e máximo de 36,9 mg/L) e Três Bicas (mínimo de 14,7 e máximo de 38,1 mg/L). São também atingidos valores altos em captações públicas, com medianas entre o VMR (25 mg/L) e o VMA (50 mg/L) na Fonte da Telha, no Gargalão e em Vale de Vargo. O potássio, apesar de ter valores normalmente abaixo do VMR (10 mg/L), mostra um padrão semelhante ao nitrato em termos de sazonalidade. Como já foi referido anteriormente, a origem destes elementos está associada a práticas agrícolas, nomeadamente a técnicas de adubagem e de rega.

A captação do Cerro das Canas possui valores de potássio e de nitrato muito altos, com um incremento brusco entre Abril de 1998 e Março de 1999, atingindo máximos de 158 mg/L de nitrato e de 27 mg/L de potássio. Os valores em nitrato baixam de uma forma regular até estabilizarem, em Março de 2004, em redor dos 65 mg/L. O potássio mantém os valores altos, oscilando regularmente entre 21 e 27 mg/L. Estes factos podem estar relacionados com o armazenamento de adubos perto da captação, com a contaminação pontual deste furo em 1998 e/ou com a mudança das práticas agrícolas nos arredores da captação, nomeadamente a implementação de sistema de rega gota a gota nos olivais. O facto desta captação não ser utilizada para extracção pode também explicar a permanência dos elementos na água.

10.3 Datações de águas

Com o objectivo de investigar a circulação profunda no aquífero Moura-Ficalho (camada 2 identificada no capítulo 8), foram utilizadas a sondagem SDM11 (F28/512) e a nascente de Enfermarias (N8/512) para colher amostras de água para datação por radiocarbono e para determinações de trítio.

Como já foi anteriormente referido, a sondagem SDM11 foi uma sondagem de prospecção mineira que intersectou níveis aquíferos repuxantes a partir dos 389.5m

Inicialmente fez-se a recolha de uma amostra de água em SDM11, a 20 de Outubro de 1988, com a

colaboração da Dr.^a Paula Carreira, na sequência da realização da sondagem, de que resultou uma idade de $19\ 160 \pm 190$ anos BP (boletim ICEN-350).

Mais tarde, na sequência de uma primeira interpretação dos ensaios referidos no item 9.3.6, repetiu-se a amostragem no mesmo ponto de água e recolheu-se outra amostra na nascente de Enfermarias (N8/512). Esta é a descarga natural do aquífero que se situa mais próximo de SDM11 que deve ser representativa de uma circulação menos profunda. Simultaneamente recolheram-se amostras de água para determinação do trítio nestes dois pontos de água. Os resultados obtidos constam da Tabela 10.2.

Tabela 10.2 – Datações por radiocarbono e teores em trítio.

N. de inventário	Data de amostragem	Ref. do Laboratório	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Idade (anos BP)	Teor em ^3H
F28/512	20-10-1998	ICEN-350	-9,46	19160 ± 190	-
N8/512	12-09-1991	ICEN-810	-14,20	1730 ± 45	$10,66 \pm 0,64^{(1)}$
F28/512	12-09-1991	ICEN-811	-12,54	21530 ± 370	$1,13 \pm 0,59^{(2)}$

(1)– ICENT – 275

(2)– ICENT – 297

A presença de trítio em ambos os pontos de água, pelo menos à data de 12 de Setembro de 1991, e as datações feitas pelo radiocarbono, denunciam a existência de mistura de água antigas e recentes em ambos os pontos de água e tornam as idades calculadas “idades aparentes”. Pena é que não tenha sido possível fazer também a determinação do trítio em 1998, quando se iniciou o fluxo de água em F28/512 e que não tenha sido possível acompanhar a evolução temporal destes parâmetros.

Com as limitações antes referidas, apenas se podem formular algumas hipóteses de trabalho a testar em futuros trabalhos.

A camada aquífera mais profunda do aquífero Moura-Ficalho, caracterizada pelos baixos valores de transmissividade e de coeficiente de armazenamento, desenvolve-se a cotas muito inferiores a qualquer nível de base, local e regional. Corresponde, assim, a um “fundo de saco” em que o tempo de residência é muito grande. Esta hipótese foi considerada no modelo conceptual subjacente ao modelo numérico de escoamento desenvolvido para este aquífero. O contributo de cada uma das camadas para o fluxo hídrico total do aquífero entre Outubro de 2000 e Dezembro de 2005, segundo este modelo de fluxo, representa-se na Figura 10.2.

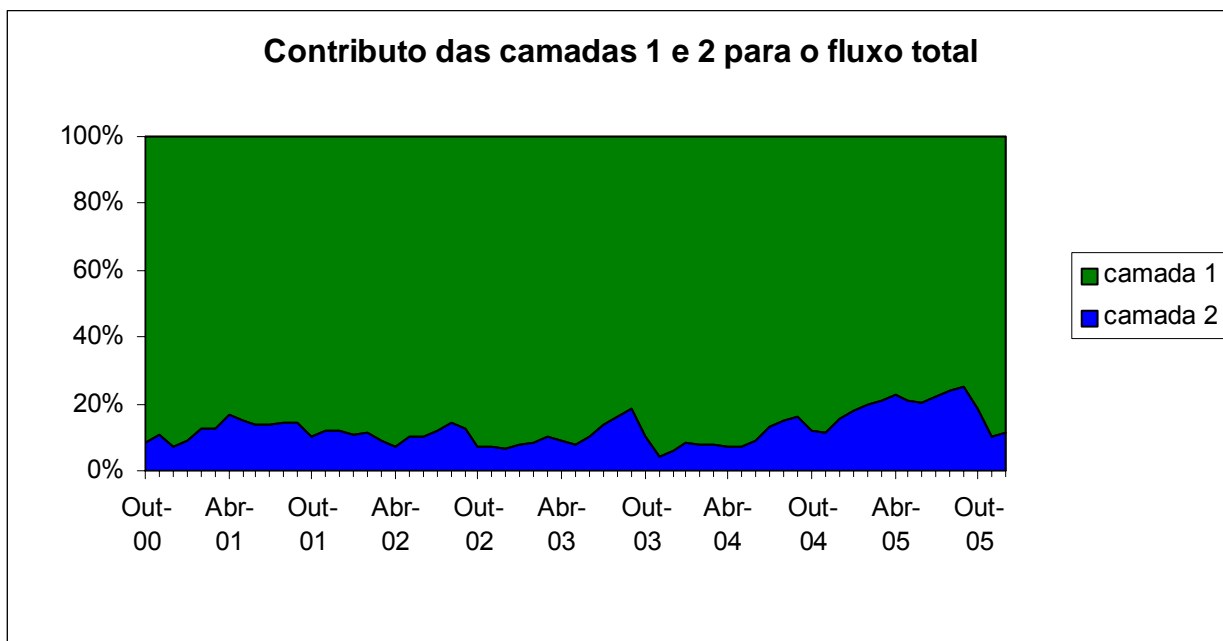


Figura 10.2 - Participação de cada uma das camadas para o fluxo total do aquífero Moura-Ficalho entre 1 de Outubro de 2000 e 31 de Dezembro de 2005 (segundo o modelo MF38)

Como se pode constatar o contributo da camada profunda é relativamente pequeno, muito embora ele seja importante para explicar as particularidades hidráulicas deste aquífero que, pelas razões expostas, se classifica como do tipo misto cársico/fissurado.

ÍNDICE

10	HIDROGEOQUÍMICA.....	75
10.1	Caracterização hidroquímica do Sistema Aquífero Moura-Ficalho	75
10.2	Evolução hidroquímica.....	78
10.3	Datações de águas.....	79

Tabela 10.1 - Estatísticos básicos principais das amostragens entre Março de 1997 e Maio 2005 ..78

Tabela 10.2 – Datações por radiocarbono e teores em trítio.....80

Figura 10.1 - Rede de monitorização da qualidade e pontos de água amostrados em Setembro de 2006.76

Figura 10.2 - Participação de cada uma das camadas para o fluxo total do aquífero Moura-Ficalho entre 1 de Outubro de 2000 e 31 de Dezembro de 2005 (segundo o modelo *MF38*)81

11 MODELOS LOCAIS (ANALÍTICOS E SEMI-ANALÍTICOS)

11.1 Introdução

Através da realização de ensaios de aquífero e da sua interpretação, essencialmente por métodos analíticos e/ou semi-analíticos, é possível conhecer localmente algumas características hidráulicas do aquífero.

Nestes casos o que se pretende é controlar determinadas variáveis e torná-las os principais factores determinantes do comportamento hidráulico que se vai observar. Assim, controlando, por exemplo, o caudal de bombagem e observando os níveis, é possível calcular determinados parâmetros e características hidráulicas locais, susceptíveis de originar o comportamento observado.

Não tendo, geralmente, as equações que controlam o fluxo subterrâneo, resolução analítica directa, fazem-se determinadas simplificações de forma a possibilitar essa resolução. Podem utilizar-se diversos modelos analíticos, conjuntamente com ábacos e tabelas (modelos semi-analíticos), no sentido de simular localmente o escoamento subterrâneo.

No presente capítulo serão apresentados alguns dos tipos de ensaios de aquífero que foram realizados na região de estudo e os modelos analíticos e semi-analíticos utilizados, fazendo-se sempre a ligação à realidade da zona de estudo, seguindo-se uma discussão dos casos reais encontrados. Comparam-se ainda os resultados da modelação analítica com modelos locais do tipo diferenças finitas, sendo este método mais desenvolvido no capítulo seguinte da presente tese.

Os ensaios de aquífero consistem num conjunto de técnicas para avaliação das características hidráulicas de aquíferos. Estas técnicas pretendem relacionar o potencial hidráulico com o fluxo da água num local ou numa área em que existem pontos de observação.

Os ensaios de aquífero mais comuns consistem na bombagem de água num furo de captação e no acompanhamento do nível da água na própria captação e/ou em furos de observação (piezómetros), mais ou menos distanciados. São os designados "ensaios de bombagem", em que normalmente se utiliza uma bomba eléctrica submersível, sendo o caudal captado sensivelmente constante, o que simplifica a interpretação do ensaio. Uma das situações que exemplifica uma excepção a esta regra, consiste num ensaio a caudal variável efectuado numa sondagem com artesianismo repuxante, que será apresentado no item 11.3.6. Outra situação em que se fazem ensaios com caudal variável, constituem os chamados *ensaios escalonados*, em que o principal objectivo é a caracterização hidráulica da captação e que, por essa razão, não são objecto do presente trabalho.

11.2 Técnicas de interpretação

As simplificações a fazer na interpretação de ensaios de bombagem dependem da situação concreta em presença e da natureza da informação disponível. Assim, numa situação em que apenas se conhecem os níveis piezométricos iniciais em vários pontos de observação e que já decorreu uma bombagem suficientemente prolongada para que as variações dos níveis dinâmicos sejam insignificantes com o tempo, poderá considerar-se que, praticamente, se atingiu uma situação de equilíbrio. Uma situação deste tipo poderá ser interpretada como um ensaio em regime permanente, como sucedeu em Fonte da Telha, como adiante se verá.

11.2.1 Regime permanente - Método de Thiem

A partir da equação geral de fluxo numerosos autores têm proposto diversas técnicas analíticas para a interpretação de ensaios de bombagem, com condições de aplicação diversas, resultantes das simplificações consideradas. Uma dessas simplificações consiste em considerar o regime permanente.

O método de Thiem (1906), cuja equação deriva da equação geral de fluxo que é apresentada no capítulo seguinte (Equação 12.1), corresponde a considerar-se que não existe variação do potencial hidráulico com o tempo, isto é, $\frac{S \cdot \partial h}{T \cdot \partial t} = 0$. Nestas condições, o potencial hidráulico (h_1 e h_2) em pontos a distâncias r_1 e r_2 do furo de bombagem terá valores tais que:

Equação 11.1

$$h_2 - h_1 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

Substituindo a diferença de potenciais pela diferença de rebaixamentos ($h_2 - h_1 = d_1 - d_2$) e resolvendo o quociente $1/(2 \cdot \pi)$ e transformando os logaritmos neperianos em decimais, obtém-se a expressão equivalente:

Equação 11.2

$$d_1 - d_2 = 0,366 \cdot \frac{Q}{T} \cdot \log_{10}\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

A equação anterior pode apresentar-se na forma:

Equação 11.3

$$T = -0,366 \cdot \frac{Q}{dh_{10}}$$

em que dh_{10} representa o declive da recta definida pela projecção em gráfico semi-log dos rebaixamentos em função da distância ao furo de bombagem, calculado a partir da equação seguinte:

Equação 11.4

$$dh_{10} = \frac{d_1 - d_2}{\log_{10} r_1 - \log_{10} r_2}$$

Com base no mesmo gráfico pode calcular-se o chamado raio de influência da captação, que representará a distância a partir da qual o rebaixamento produzido pela bombagem é zero, isto é, no gráfico de rebaixamentos, a distância correspondente à intersecção da recta com o eixo das abcissas.

Quando existem medições no próprio furo de bombagem, pode também considerar-se este par de valores, constituído pelo raio do poço e respectivo rebaixamento. No caso de existirem dois ou mais piezómetros deverá definir-se a recta de melhor ajustamento com estes pontos, devendo o que representa a captação situar-se acima desta recta, isto é, o rebaixamento observado será superior ao rebaixamento que se lê na recta, para a distância correspondente ao raio do poço. Esta situação é normal e corresponde às perdas de carga que existem na própria captação (na admissão, quer na zona dos drenos quer na própria bomba submersível).

No caso de aquíferos livres em que os rebaixamentos observados sejam significativos em relação à espessura saturada total inicial (H_0), pode utilizar-se o mesmo método interpretativo desde que se utilize a chamada *correção de Dupuit*. Este procedimento consiste na substituição dos rebaixamentos observados (d) por rebaixamentos corrigidos (d'), calculados pela equação:

Equação 11.5

$$d' = d - \frac{d^2}{2 \cdot H_0}$$

Na zona da Fonte da Telha, actual origem de água para abastecimento a Moura, as bombagens prolongam-se por semanas ou mesmo meses de forma ininterrupta. Atingem-se níveis dinâmicos praticamente estabilizados, o que justifica a aplicação do método de Thiem para o cálculo da transmissividade. Como adiante se verá, o valor encontrado é da ordem de 3500 m²/dia. Igualmente na zona da Herdade das Cortes, próximo de Vale de Vargo, foi calculado um valor de transmissividade da ordem de 2000 a 2400 m²/dia, interpretado pelo método de Thiem.

11.2.2 Regime transitório

Os vários métodos de interpretação de ensaios em regime transitório correspondem a diferentes técnicas de resolução da chamada *equação de Theis* (1935), que resulta da aplicação da equação geral de fluxo (Equação 12.1) a um aquífero confinado ideal, sem fluxos verticais assumindo a

forma:

Equação 11.6
$$d = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W(u)$$

em que intervêm a chamada *função do poço*, definida por:

Equação 11.7
$$W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} \cdot du$$

em que:

Equação 11.8
$$u = \frac{r^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t}$$

O significado das variáveis é o seguinte:

d - rebaixamento

T – transmissividade

S – coeficiente de armazenamento

t – tempo

r – distância ao furo de bombagem

O conjunto de pressupostos admitidos na dedução das equações de Theis é o seguinte:

Aquífero homogéneo, isótropo e de extensão infinita;

Fluxo radial em regime laminar;

Ausência de recargas exteriores (regime não influenciado);

Furo de captação totalmente penetrante e de diâmetro zero;

Caudal de bombagem constante.

A função do poço, que não tem resolução analítica, corresponde a uma série infinita cujos primeiros termos se apresentam seguidamente:

Equação 11.9
$$W(u) = -0,577216 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots$$

11.2.2.1 Método de Theis

O método interpretativo de Theis consiste na projecção em gráfico bilogarítmico dos tempos e rebaixamentos observados. A esta curva de campo sobrepõe-se um ábaco, em papel transparente, que representa a função do poço ($W(u)$ em função de $1/u$). Depois de seleccionado o troço de

melhor ajustamento basta escolher um ponto qualquer no gráfico de campo (t,d) e ler as coordenadas do ábaco correspondentes $(1/u, W(u))$. Para simplificação de cálculos, escolhe-se normalmente o ponto $(10,1)$ do ábaco e lê-se o valor que se lhe sobrepõe na curva de campo. Estes dois pares de valores entram então na Equação 11.10 e na Equação 11.11 para o cálculo da transmissividade (T) e do coeficiente de armazenamento (S) , respectivamente.

Equação 11.10
$$T = \frac{Q \cdot W(u)}{4 \cdot \pi \cdot d}$$

Equação 11.11
$$S = \frac{4 \cdot T \cdot t}{r^2 \cdot 1/u}$$

Este procedimento é bastante trabalhoso e existem diversos programas de computador que resolvem a função do poço, por sucessivas iterações, até à aproximação requerida. Foi utilizado para este efeito o programa desenvolvido pelo Prof. Costa Almeida chamado *PumpTest* (2005).

11.2.2.2 Método de Jacob

Jacob (1940) comprovou que para valores da variável auxiliar $u < 0,03$ (na prática considera-se geralmente $u < 0,1$) poderia considerar-se apenas os dois primeiros termos da série, simplificando a função do poço para a forma:

Equação 11.12
$$W(u) = -0,577216 - \ln(u)$$

Com a simplificação de Jacob, a equação dos rebaixamentos passa a ter a forma:

Equação 11.13
$$d = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln\left(\frac{2,25 \cdot T \cdot t}{r^2 \cdot S}\right)$$

o que, simplificando e convertendo os logaritmos neperianos em decimais, é equivalente à forma mais habitual da equação de Jacob:

Equação 11.14
$$d = 0,183 \cdot \frac{Q}{T} \cdot \log_{10}\left(\frac{2,25 \cdot T \cdot t}{r^2 \cdot S}\right)$$

em que r representa a distância do piezómetro à captação, Q é o caudal da captação e t é o tempo desde que se iniciou a bombagem.

O método de Theis, tal como diversos outros (como os métodos de Chow (1952), de Hantush (1964), de Pricket (1965), entre outros), baseia-se na construção de gráficos de campo e na

sobreposição destes com ábacos.

O método interpretativo de Jacob baseia-se na aplicação de uma transformada logarítmica para linearizar a relação tempos/rebaixamentos. A equação da recta de melhor ajustamento às observações de campo permite calcular os parâmetros hidráulicos do aquífero e caracterizar algumas particularidades deste, como se verá seguidamente.

O método baseia-se na projecção em papel semi-logarítmico dos rebaixamentos, em ordenadas, contra o tempo, no eixo das abcissas de escala logarítmica. Os pontos resultantes definem uma recta cujo declive (Δd) permite calcular a transmissividade pela equação:

Equação 11.15
$$T = 0,183 \cdot \frac{Q}{\Delta d}$$

O valor da intersecção da recta com o eixo dos tempos (t_0) permite calcular o coeficiente de armazenamento, pela equação:

Equação 11.16
$$S = 2,25 \cdot \frac{T \cdot t_0}{r^2}$$

Esta foi a técnica mais frequentemente utilizada neste trabalho, muito embora muitas tarefas manuais de construção de gráficos e de cálculo fossem feitas utilizando as capacidades do programa *Microsoft Excel 2000*. Em particular foi utilizado o método dos mínimos quadrados e os coeficientes de correlação para definir as rectas de melhor ajustamento e seleccionar os troços a considerar. As equações das rectas assim definidas foram utilizadas para o cálculo do declive e da intersecção com o eixo das abcissas, com o que foram calculados o T e o S , por aplicação da Equação 11.15 e da Equação 11.16, respectivamente. Pode concluir-se que os métodos gráficos, que foram agora revistos com as ferramentas analíticas do *Excel 2000*, forneceram resultados perfeitamente aceitáveis dado que as diferenças observadas foram mínimas, como se verá no capítulo de interpretação de ensaios efectuados.

Como foi referido anteriormente, a simplificação de Jacob em relação à função do poço, apenas é aceitável, na prática, para valores de $u < 0,1$. Nos ensaios realizados verificou-se, frequentemente, que o alinhamento dos pontos segundo uma recta apenas se observa, depois de decorrido algum tempo. As primeiras medições não foram consideradas na definição da recta, com a qual se calcularam os valores de T e de S . Nesses casos, verificou-se que os pontos iniciais que não estavam alinhados segundo uma recta, estavam fora do período de validade da aproximação de Jacob, uma vez que:

Equação 11.17

$$t > 2,5 \cdot r^2 \cdot \frac{S}{T}$$

em que r é a distância à captação ou, no caso de medições na própria captação, o raio desta.

A Equação 11.17 evidencia a importância da distância à captação na definição do tempo a partir do qual se torna válida a aproximação de Jacob. Por essa razão, esta questão torna-se particularmente pertinente nos ensaios com medições em piezómetros bastante afastados da captação. Contudo, como adiante se verá, na interpretação do ensaio do Poço da Mina, alguns dos valores "anómalos" inicialmente observados, vieram a revelar-se como estando fora do período de validade da aproximação de Jacob, muito embora as medições fossem feitas na própria captação.

O método de Jacob foi o mais utilizado nos ensaios realizados na região e a interpretação foi iniciada durante o próprio ensaio. A prática demonstrou que ocorrem, frequentemente, comportamentos "anómalos", em relação à evolução linear dos rebaixamentos relativamente ao logaritmo decimal do tempo, que importa interpretar. Por vezes foi necessário fazer algumas observações complementares ou alterar o próprio programa inicial do ensaio, como se verá na interpretação dos ensaios realizados, em particular no ensaio das Boieiras, que já havia sido objecto de uma publicação (Costa, 1992). No citado artigo fica ainda evidenciada a importância dos ensaios de recuperação de níveis, que são igualmente interpretados utilizando a aproximação de Jacob.

11.2.2.3 Ensaios de recuperação

Os ensaios de recuperação de níveis são interpretados utilizando o princípio da sobreposição de efeitos e a equação de rebaixamentos de Jacob (Equação 11.15). A equação simplificada dos rebaixamentos residuais (d') é a seguinte:

Equação 11.18

$$d' = 0,183 \cdot \frac{Q}{T} \cdot \log_{10} \left(\frac{t + t'}{t'} \right)$$

em que t é o tempo de duração da bombagem e t' é o tempo a partir do instante em que parou a bomba.

Projectando os rebaixamentos residuais em função de $\frac{t + t'}{t'}$, em escala logarítmica, obtêm-se uma recta cujo declive permite o cálculo da transmissividade, mediante a aplicação da Equação 11.15.

11.2.3 Interpretação de situações particulares

Os ensaios de aquífero realizados na presente área de estudo, configuram uma gama de situações particulares e de técnicas de interpretação que merecem uma análise mais aprofundada.

11.2.3.1 Efeito de armazenamento em poços de grande diâmetro e penetração parcial

Uma das "anomalias" que se observou nos ensaios realizados resultou do efeito de armazenamento do poço. De facto, num ensaio realizado num poço situado no interior da Mina da Preguiça, verificou-se que os rebaixamentos, mesmo excluindo os que não se encontram dentro do período de validade da aproximação de Jacob ($t \leq 3,02$ minutos), definem uma curva com a convexidade para baixo, antes de definirem um alinhamento rectilíneo nas medições finais. Esta anomalia foi interpretada pelo efeito do armazenamento do poço (trata-se de um poço com diâmetro de 4,50 m) e pelo efeito da penetração parcial do mesmo. Os cálculos são apresentados no item correspondente a este ensaio, mas as equações consideradas foram as que se apresentam seguidamente.

O efeito de armazenamento de um poço de grande diâmetro (de raio r_p), num ensaio com o objectivo de determinar os parâmetros hidráulicos do aquífero, exige que apenas sejam consideradas as medições posteriores a um tempo t (Papadopoulos e Cooper, 1967, *in* Villanueva e Iglesias, 1984), tal que:

Equação 11.19
$$t > 25 \cdot \frac{r_p}{T}$$

Nestas condições, segundo os autores anteriormente citados, os erros de medição provocados pelo efeito de armazenamento do poço serão inferiores a 2%. Contudo, como se pode constatar na , na situação real antes referida, mesmo depois de não serem consideradas as medições das primeiras 2 horas e 24 minutos, os pontos correspondentes às medições seguintes, ainda parecem definir dois alinhamentos, o primeiro de maior declive e um segundo de menor declive. Considerou-se, então a hipótese de haver outra origem para esta perturbação - a penetração parcial do poço.

Se a zona de captação de um furo não atravessa toda a espessura de um nível aquífero, como já foi referido, originam-se fluxos com uma componente vertical nas imediações da zona de admissão. Este encurvamento das linhas de fluxo origina perdas de carga suplementares, que se traduzem num alinhamento de pontos no gráfico semi-log com um declive superior ao que teria sem este efeito. Segundo Villanueva e Iglesias (1984), a partir de um instante t tal que:

Equação 11.20
$$t > \frac{b^2 \cdot S}{2 \cdot T}$$

em que b é a espessura do nível aquífero captado e S e T são o coeficiente de armazenamento e a transmissividade, respectivamente.

No caso dos ensaios de recuperação, ainda segundo o mesmo autor, o tempo de recuperação (t') a

partir do qual se deixa de fazer sentir o efeito da penetração parcial, será dado por:

Equação 11.21
$$t' > \frac{10^4 \cdot r^2 \cdot S}{4 \cdot T}$$

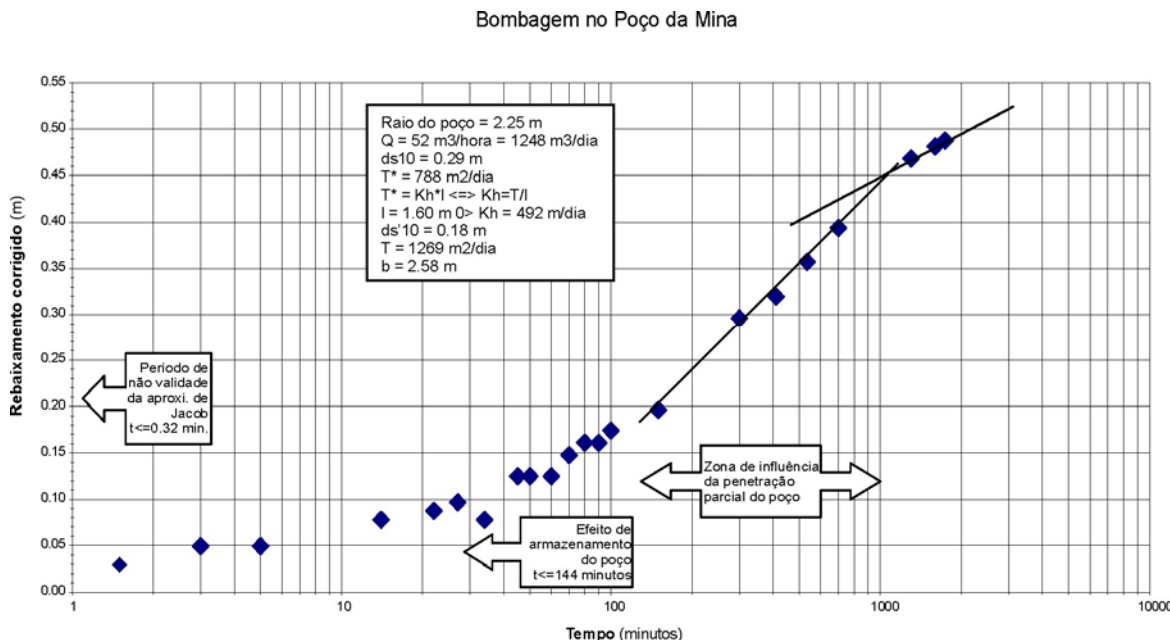


Figura 11.1 Bombagem no poço da mina da Preguiça, com identificação de vários efeitos que afectaram os níveis observados

Uma vez ultrapassado o instante t (ou t') os efeitos desta penetração parcial deixam de se fazer sentir, passando os pontos a alinhar-se segundo uma recta de menor declive, que corresponderá à transmissividade do nível aquífero ensaiado. Assim, pela aplicação da Equação 11.15, poderão calcular-se os valores de transmissividade real do aquífero (T) e da transmissividade afectada pela penetração parcial (T^*). Poderá então calcular-se a condutividade hidráulica horizontal (Kh) do nível aquífero ensaiado, conhecendo-se a espessura total captada (igual à penetração do furo no nível aquífero) (λ), pela equação:

Equação 11.22
$$Kh = \frac{T^*}{\lambda}$$

e a espessura total do nível aquífero ensaiado (b), pela equação:

Equação 11.23
$$b = \frac{T \cdot \lambda}{T^*}$$

No caso real referido foi calculada uma espessura total de 2,58 m, nos quais o Poço da Mina,

apenas penetrou 1,60 metros, restando cerca de 1 metro produtivo, abaixo do fundo da captação.

11.2.3.2 Barreiras hidráulicas e teoria das imagens

A existência de barreiras hidráulicas na área afectada por um ensaio de bombagem, vai traduzir-se num incremento ou redução dos rebaixamentos observados, conforme a barreira seja negativa (por exemplo um limite impermeável do aquífero) ou positiva (por exemplo, um rio influente), respectivamente. Estas situações são interpretadas nos ensaios de bombagem pelo chamado *método das imagens*.

O método das imagens diz que num espaço xy se existe um furo em bombagem a uma determinada distância de uma barreira impermeável rectilínea e de extensão infinita para a área de estudo, os rebaixamentos que se produzem no aquífero serão a soma dos rebaixamentos devidos ao furo de bombagem (furo real) com os rebaixamentos produzidos por um furo imaginário (furo imagem), situado simetricamente ao furo real, em relação à barreira rectilínea impermeável, e que tivesse iniciado a bombagem no mesmo instante. Como se demonstra em Villanueva e Iglesias (1984), o declive deste segundo troço recto será o dobro do primeiro. No caso de barreiras positivas, seria o equivalente mas com o furo imagem a injectar um caudal igual ao que está a ser extraído no furo real. Foi aplicado este método, articulado com o método de Jacob, na interpretação de um ensaio de bombagem (Casal das Boieiras), na zona de Moura, como se verá. Trata-se neste caso de uma barreira negativa.

O método das imagens permite calcular a distância à barreira e, em determinadas condições, permite mesmo localizar a barreira. Pode ser utilizado com mais do que uma barreira desde que estas sejam rectilíneas e de extensão infinita.

Para o cálculo da distância à barreira, utilizam-se as características dos dois alinhamentos de pontos em gráfico semilogarítmico. Considerando as duas equações das rectas (a e b) na forma $d_a = m_a \cdot t + t_0^a$ e $d_b = m_b \cdot t + t_0^b$, pode calcular-se a distância entre o piezómetro e o furo imagem (r') a partir da distância entre o piezómetro e o furo de bombagem (r), pela equação:

Equação 11.24

$$r' = r \cdot \sqrt{\frac{t'}{t}}$$

em que t representa o tempo correspondente a um determinado rebaixamento (d), escolhido arbitrariamente, de acordo com a recta a e t' representa o tempo correspondente a um incremento de rebaixamentos igual a d , entre o prolongamento do 1º troço recto e o segundo.

Não foram encontradas referências bibliográficas sobre o efeito de barreira nos ensaios de recuperação de níveis. O tema foi investigado mediante a utilização do modelo de diferenças finitas

Modflow 2000, com a interface *GMS (v. 5.1)*, desenvolvendo-se um pequeno modelo de simulação de fluxo. Inicialmente considerou-se apenas uma área quadrangular com 2 quilómetros de lado com células de tamanho variável, espessura constante de 10 metros e refinamento na zona do furo e do piezómetro. Os valores observados e simulados foram discrepantes. Conseguiu-se uma similitude muito maior considerando um domínio de 20 quilómetros de lado. Nestas condições, e com uma célula de tipo furo e uma célula do tipo ponto de observação, fez-se uma primeira simulação do ensaio (com bombagem e recuperação), considerando as medições efectuadas no piezómetro. Admitiu-se arbitrariamente que o potencial hidráulico inicial corresponde à cota +191,77, representando-se os valores simulados e observados (a tracejado) na Figura 11.2.

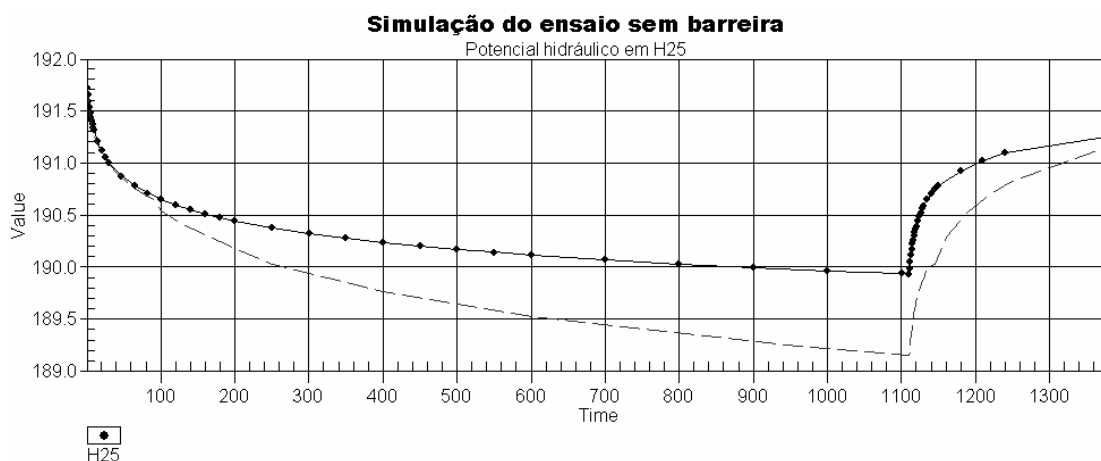


Figura 11.2 Simulação da bombagem e recuperação sem qualquer barreira. Considerada uma transmissividade de $37 \text{ m}^2/\text{dia}$ e o coeficiente de armazenamento $8,51 \times 10^{-5}$

Na Figura 11.3 representa-se as linhas piezométricas simuladas da zona de estudo no final da bombagem.

Numa segunda fase, foi colocado um arco do tipo barreira à distância calculada analiticamente (101,5 m do piezómetro e 139,5 do furo de bombagem). A evolução do potencial hidráulico simulada para o piezómetro consta da Figura 11.4, onde também se representam os valores observados.

Na Figura 11.5 representa-se a área envolvente da zona de estudo, com os resultados da simulação no final da bombagem.

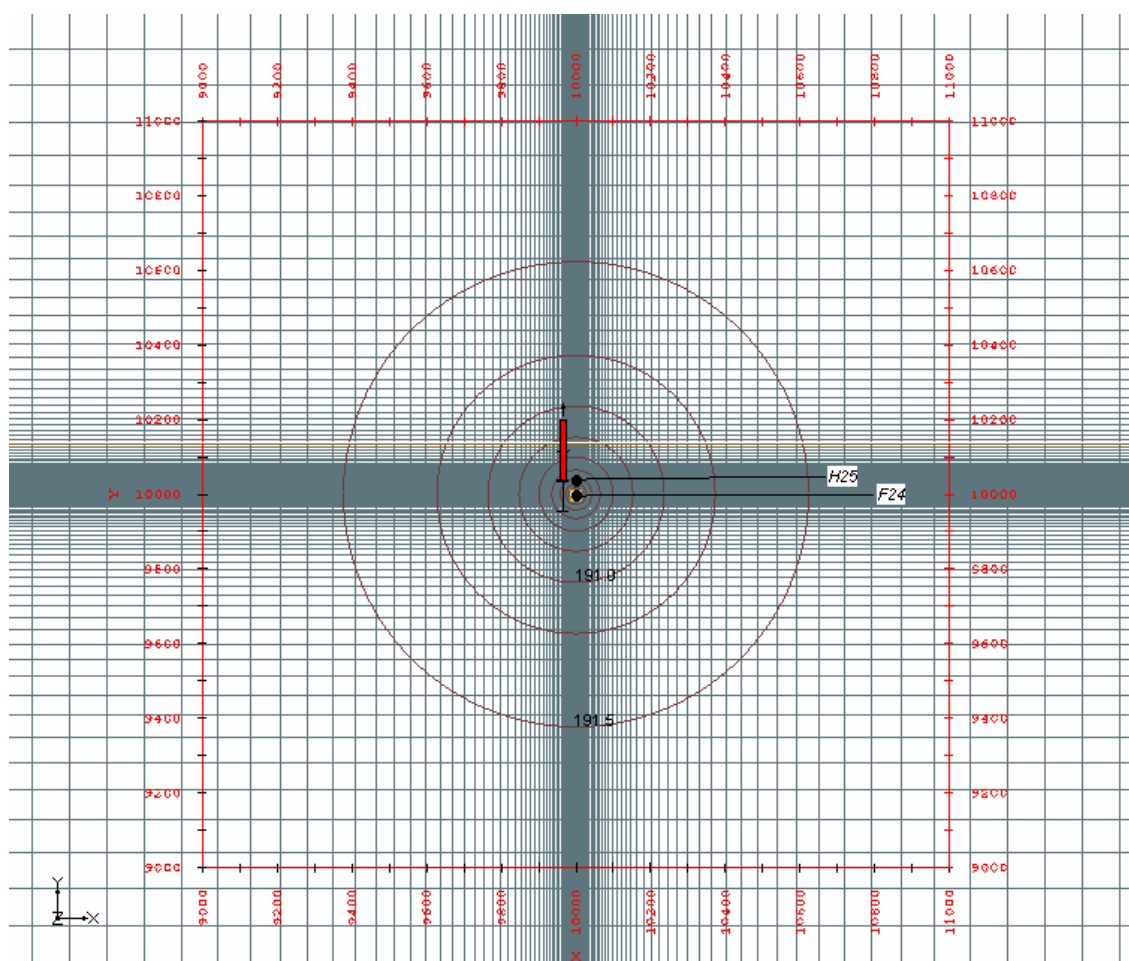


Figura 11.3 Linhas piezométricas simuladas no final da bombagem, considerando a transmissividade de $37 \text{ m}^2/\text{dia}$ e o coeficiente de armazenamento de $8,51 \times 10^{-5}$ (sem barreira)

Os resultados obtidos com o modelo foram ainda utilizados na construção dos gráficos tradicionalmente utilizados na interpretação de ensaios de bombagem e de recuperação (Figura 11.6 e Figura 11.7) pelo método de Jacob. É assinalado o período de não validade da aproximação de Jacob (neste caso calculada em 11,8 minutos). Apesar de, nas presentes condições, ser anulada uma parte significativa dos gráficos, da observação e análise destes pode concluir-se que o efeito de barreira se faz sentir também na recuperação, sendo a relação de declives entre os dois troços rectilíneos, de 1 para 1,5. Afigura-se fundamentada a conclusão de que, com base nos resultados do ensaio de Boeiras, quer da bombagem quer da recuperação, deverá existir uma barreira negativa transversal ao alinhamento definido pelo furo e pelo piezómetro, distante deste cerca de 100 m.

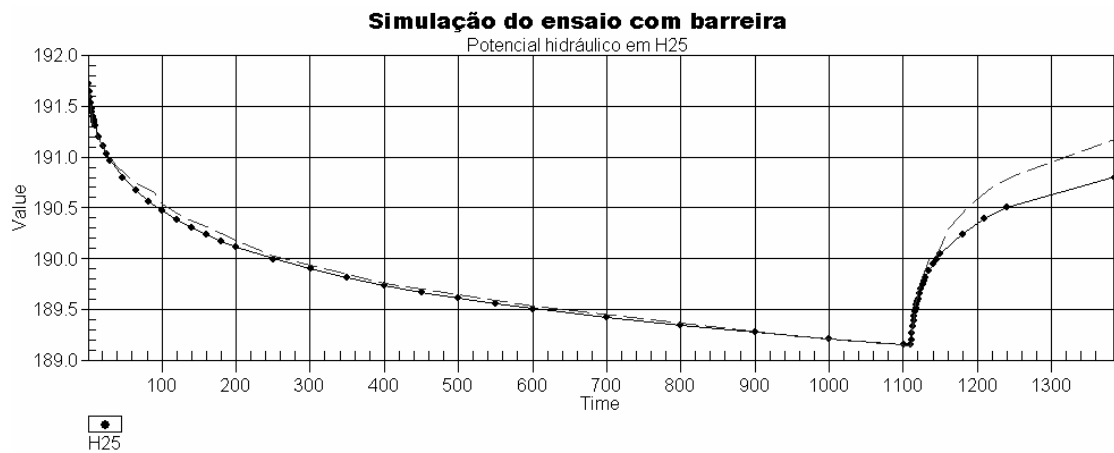


Figura 11.4 Simulação da bombagem e recuperação com a barreira situada a uma distância de 101,5 m do piezômetro.

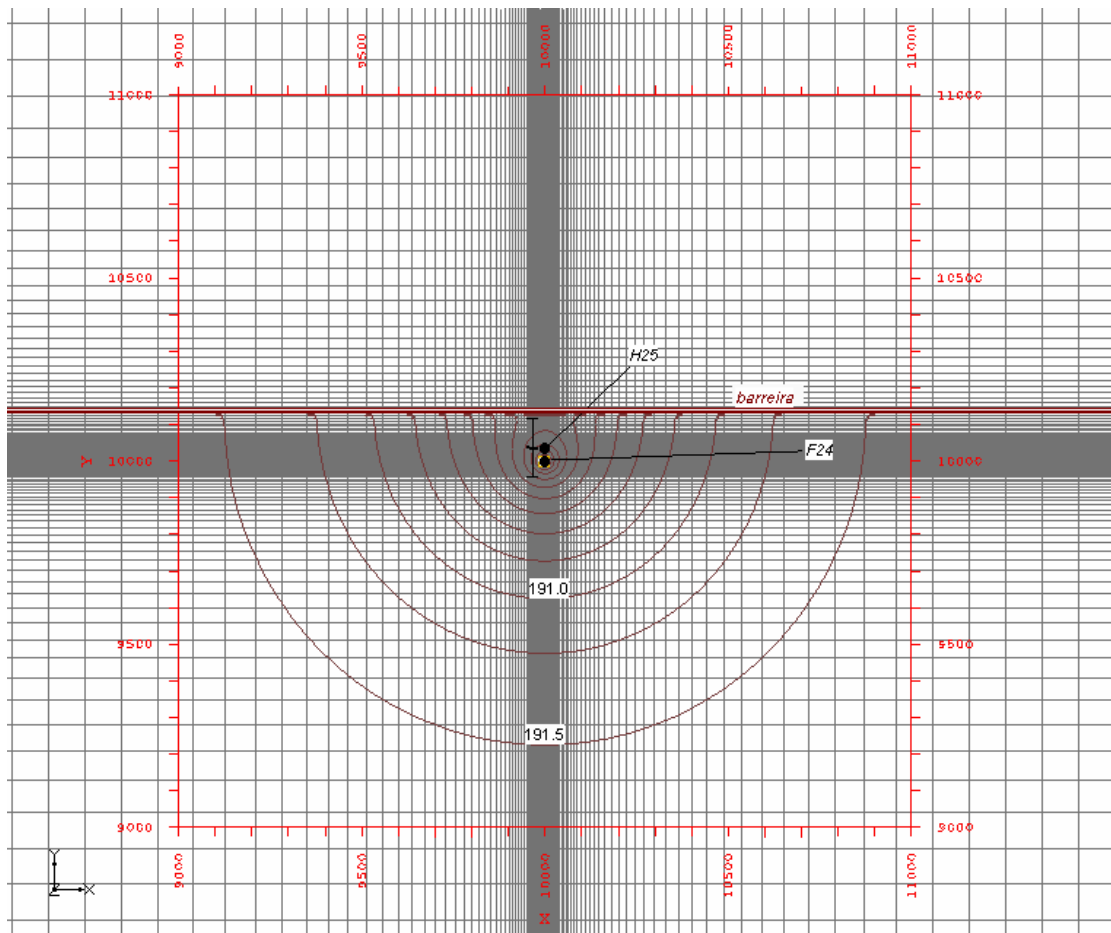


Figura 11.5 Linhas piezométricas no final da bombagem, considerando $T = 37 \text{ m}^2/\text{dia}$ e $S = 8,51 \times 10^{-5}$, influenciadas pela barreira

Foram ainda simuladas várias condições de condutividade hidráulica e de localização da barreira em relação ao furo e piezômetro, concluindo-se que, muito embora se identifiquem dois troços

rectilíneos no gráfico semilogarítmico de recuperação, a relação de declives entre si é variável. Sugere-se que em situações deste tipo (recuperação influenciada pela presença de uma barreira), seja utilizado o declive do primeiro troço recto da bombagem para o cálculo da transmissividade, por aplicação da Equação 11.15.

Os declives que se observam no gráfico de recuperação, conduzem a valores de T erróneos, se for aplicada a formulação antes apresentada. Seria interessante investigar a fundamentação teórica para esta constatação e, eventualmente, deduzir uma técnica analítica adequada para a interpretação quantitativa de ensaios de recuperação influenciados por barreiras, mas fica fora do âmbito do presente trabalho.

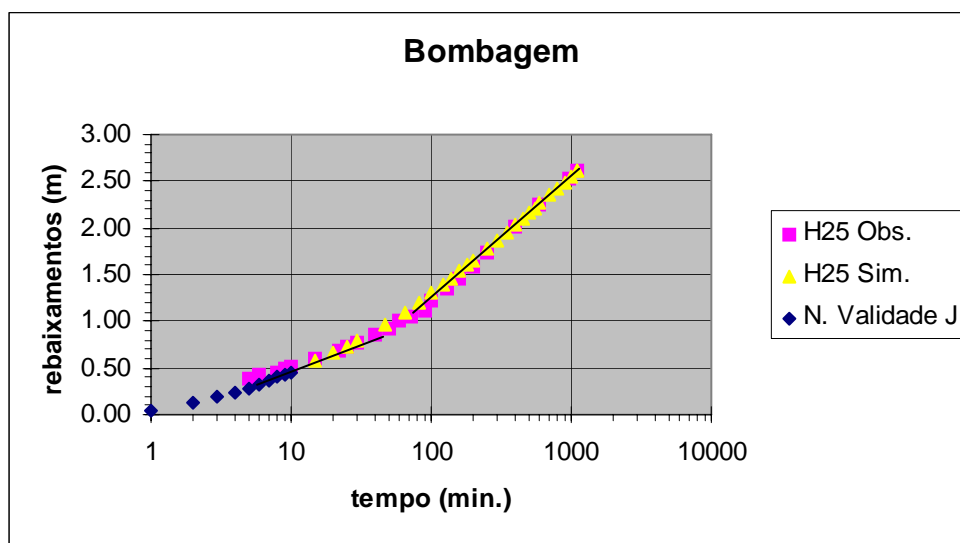


Figura 11.6 Rebaixamentos observados e simulados no piezómetro H25 durante a bombagem, do ensaio das Boieiras (Moura).

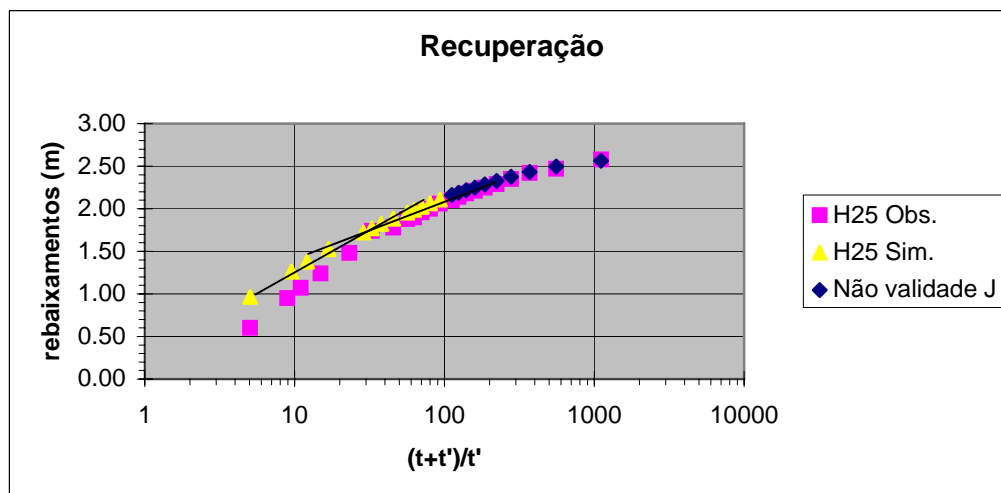


Figura 11.7 Rebaixamentos observados e simulados no piezómetro H25 durante a recuperação, do ensaio das Boieiras (Moura)

11.2.3.3 Ensaios em furos repuxantes (método de Ferris)

Em determinadas situações particulares como a de sondagens de prospecção de pequeno diâmetro com artesianismo repuxante, pode ainda realizar-se um tipo de ensaio de aquífero em que, após o fecho da boca da sondagem até à plena recuperação da pressão, se acompanha a evolução do caudal ao longo do tempo. Nestas condições é imposto um potencial hidráulico constante, correspondente à cota da boca da sondagem, e o caudal é que vai diminuindo de forma a adaptar-se a este novo potencial. Segundo Ferris *et al* (1962), a equação que exprime este caudal terá a forma:

$$\text{Equação 11.25} \quad Q = 2 \cdot \pi \cdot T \cdot d \cdot G(\alpha)$$

em que o termo $G(\alpha)$ representa uma função da forma:

$$\text{Equação 11.26} \quad G(\alpha) = \frac{4 \cdot \alpha}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} \left(x \cdot e^{-\alpha \cdot x^2} \cdot \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{Y_0(x)}{J_0(x)} \right) \right) \cdot dx$$

em que Y_0 e J_0 são funções de Bessel de ordem zero de 1ª e 2ª espécies, respectivamente e α é dada por:

$$\text{Equação 11.27} \quad \alpha = \frac{T \cdot t}{r^2 \cdot S}$$

As variáveis ainda não identificadas têm o seguinte significado:

d - rebaixamento constante na sondagem;

t - tempo decorrido desde o início do ensaio;

r - raio efectivo da sondagem.

Na interpretação deste tipo de ensaios utiliza-se um ábaco da função $G(\alpha)$ (Ferris *et al*, 1962) que se sobrepõe à curva experimental, construída em gráfico bilogarítmico com base nos valores de caudal em função do tempo. Desta sobreposição resultam dois pares de valores (Q, t) e $(G(\alpha), \alpha)$, que são utilizados na Equação 11.28 e na Equação 11.29 para o cálculo da transmissividade e do coeficiente de armazenamento, respectivamente.

$$\text{Equação 11.28} \quad T = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot d \cdot G(\alpha)}$$

$$\text{Equação 11.29} \quad S = \frac{T \cdot t}{r^2 \cdot \alpha}$$

Na sondagem *SDM11* (Casal de Santo André) fez-se um ensaio deste tipo, que foi objecto de publicação (Costa, 1988) e que consta da descrição dos ensaios realizados na região.

11.2.3.4 Aproximação de Logan

Existe ainda uma técnica que se destina a estimar o valor da transmissividade do aquífero, de forma aproximada, na ausência de valores temporais de níveis e caudais. Trata-se do método de Logan (1964), que deriva da aplicação do método de Thiem (Equação 11.2), assumindo como valor típico da relação logarítmica da equação de Thiem, o valor 3,32. Sendo Q o caudal e d o respectivo rebaixamento e considerando um aquífero confinado em regime permanente, tem-se que:

Equação 11.30
$$T = 1,22 \cdot \frac{Q}{d}$$

A razão entre o raio de influência e o raio do poço é geralmente desconhecida, mas como se está a considerar a transformada logarítmica desta razão, as variações são menores.

Para o caso de aquíferos livres, Logan (1964) propõe a seguinte aproximação:

Equação 11.31
$$T = 2,43 \cdot \frac{Q \cdot h_0}{d \cdot (2 \cdot h_0 - d)}$$

em que h_0 é a espessura saturada inicial e d é o rebaixamento “estabilizado”.

11.2.3.5 Outras “anomalias” e outros ensaios

Em meios fissurados e em particular em meios cársicos, as heterogeneidades são de tal modo grandes e frequentes que podem produzir várias “anomalias”, como sucedeu nos ensaios do Gargalão. Como se verá seguidamente, observam-se vários troços rectos no gráfico semilogarítmico, quer da bombagem quer da recuperação. Nestes casos, quantitativamente apenas se poderá estimar a gama de valores da transmissividade.

Existem ainda os chamados ensaios escalonados. Neste caso são impostos pelo menos três patamares crescentes de caudal de bombagem mas, o objectivo principal deste tipo de ensaios a caudal variável consiste na caracterização da captação, pelo que estão fora do âmbito da presente tese.

Em determinadas condições particulares podem utilizar-se outros ensaios de aquífero, em particular os ensaios de injeção ou ensaios de recarga instantânea (os chamados *slug tests*, na nomenclatura anglosaxónica). Neste caso é injectada “instantaneamente” uma determinada quantidade de água e acompanha-se a posterior evolução de níveis. Este tipo de ensaios apenas se pode aplicar em situações de baixas condutividades hidráulicas, não sendo normalmente aplicáveis em meios cársicos. Muito embora se tenham ensaiado várias sondagens desta forma, não foi possível obter um conjunto fiável de valores de tempos e rebaixamentos, devido à resposta excessivamente rápida do aquífero.

11.3 Ensaios efectuados na região

Na Figura 11.8 assinalam-se os locais onde se efectuaram ensaios de aquífero, os quais serão sumariamente descritos nos itens seguintes.

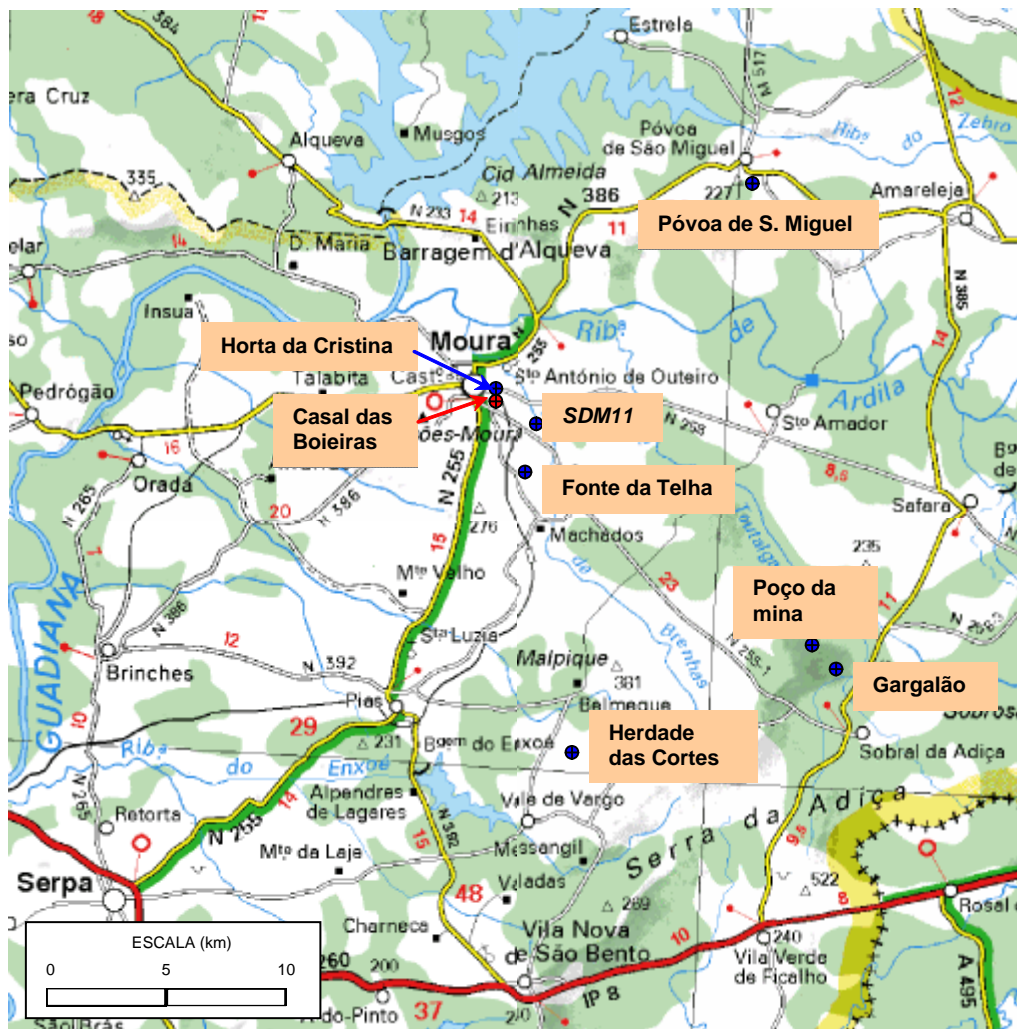


Figura 11.8 Locais onde se fizeram os ensaios de aquífero.

11.3.1 Ensaio no poço da mina da Preguiça

O poço situa-se no interior da mina e, depois de equipado com uma bomba submersível, foi aproveitado para rega. Atendendo às características particulares deste poço, originalmente aberto no âmbito de trabalhos mineiros, foi inventariado com a designação F20/513 (Figura 11.9).

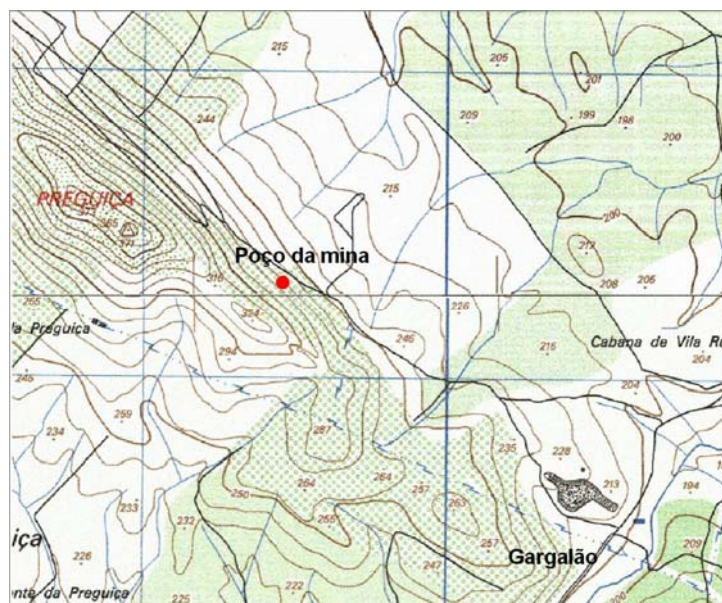


Figura 11.9 Local dos trabalhos (extracto das folhas 513 e 524 da Carta Militar de Portugal, na escala 1/25.000)

Realizaram-se ensaios de bombagem e recuperação de níveis, sendo utilizada uma bomba submersível e um gerador, com um caudal constante de $52 \text{ m}^3/\text{hora}$, durante 29 horas.

O poço tem um raio de 2,25 metros, uma profundidade de 55 metros e, o nível da água, situava-se inicialmente a 51,07 m. Os valores medidos durante a bombagem constam da Tabela 11.3.1, onde se apresentam os rebaixamentos calculados com a correcção de Dupuit a partir da Equação 11.5 (4ª e última colunas), por se tratar de um aquífero livre com rebaixamentos significativos em relação à espessura saturada inicial.

Na Figura 11.10 encontra-se a representação gráfica da interpretação deste ensaio pelo método de Jacob, com indicação dos vários detalhes considerados.

Assim, além da correcção de Dupuit, já referida, considerou-se o período de não validade da aproximação de Jacob (calculado em 3,02 minutos, a partir da Equação 11.17), bem como o facto de se tratar de um poço de grande diâmetro. No sentido de evitar o efeito do armazenamento do poço, nos cálculos da transmissividade do aquífero, apenas foram considerados dados posteriores aos primeiros 144 minutos (calculados a partir da Equação 11.19).

Tabela 11.3.1 – Níveis medidos e rebaixamentos calculados no Poço da Mina na bombagem.

Tempo (min.)	Nível (m)	Reb. (m)	Reb. Corr. (m)	Tempo (min.)	Nível (m)	Reb. (m)	Reb. Corr. (m)
0	51,07	0,00	0,00	80,0	51,24	0,17	0,16
1,5	51,10	0,03	0,03	90,0	51,24	0,17	0,16
3	51,12	0,05	0,05	100,0	51,26	0,19	0,17
5	51,12	0,05	0,05	150,0	51,28	0,21	0,20
14	51,15	0,08	0,08	300,0	51,40	0,33	0,30
22	51,16	0,09	0,09	410,0	51,43	0,36	0,32
27	51,17	0,10	0,10	535,0	51,48	0,41	0,36
34	51,15	0,08	0,08	700,0	51,53	0,46	0,39
45	51,20	0,13	0,12	1300,0	51,64	0,57	0,47
50	51,20	0,13	0,12	1600,0	51,66	0,59	0,48
60	51,20	0,13	0,12	1740,0	51,67	0,60	0,49
70	51,23	0,16	0,15				

A descrição feita por pessoas de Sobral da Adiça, que trabalharam na abertura deste poço, referia que o caudal extraído com várias bombas em simultâneo durante a abertura do poço, era cada vez maior, até não ser possível escoar tanta água. Esta descrição e o facto de as três últimas leituras (ver gráfico da Figura 11.10) traduzirem rebaixamentos inferiores ao previsível se fosse mantido o declive que se vinha a definir, acrescido do facto de a recuperação de níveis não ser, aparentemente compatível com a interpretação da bombagem, conduziram à hipótese de se tratar de uma captação incompleta, isto é, o poço não atravessa completamente este nível aquífero. Assim, a partir do 1º troço rectilíneo ($ds_{10}=0,29$ m) calculou-se uma transmissividade (T^* , na Figura 11.10), que corresponderá ao produto da permeabilidade horizontal pela penetração do poço no nível aquífero (representada por “l”, na Figura 11.10). A transmissividade correspondente ao último troço rectilíneo representará o produto da mesma permeabilidade horizontal (Kh , na Figura 11.10) pela espessura efectiva do nível aquífero, neste local.

De acordo com a hipótese interpretativa apresentada, a transmissividade real deste nível aquífero, será $1269 \text{ m}^2/\text{dia}$ e a espessura do nível aquífero captado será de 2,58 metros, nos quais o Poço da Mina, apenas penetrou 1,60 metros, restando cerca de 1 metro produtivo, abaixo do fundo da captação. Na hipótese formulada, o ensaio de recuperação, cujas medições constam da Tabela 11.3.2, apenas seria interpretável num último troço rectilíneo do gráfico de recuperação em que se verificasse a condição representada na Equação 11.21.

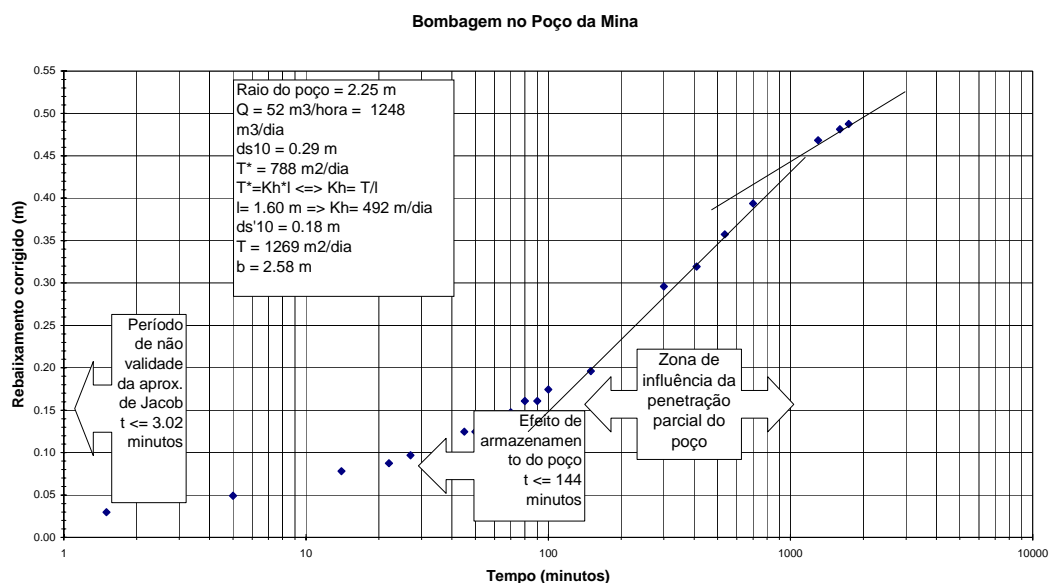


Figura 11.10 Interpretação da bombagem no poço da mina

Considerando o coeficiente de armazenamento de 0,20, calculado para a zona do Gargalão, a cerca de 1000 metros de distância, resulta tempo de recuperação 2873 minutos. Com base na formulação apresentada, conclui-se que se iriam obter valores representativos na recuperação, apenas a partir do 3º dia de ensaio, para o que a bombagem precedente deveria ter uma duração bastante maior do que as 29 horas (pelo menos 3 ou 4 dias).

Os valores medidos e calculados para a recuperação constam da Tabela 11.3.2 e a tentativa de interpretação, que se concluiu ser inválida, consta da Figura 11.11.

Tabela 11.3.2 – Níveis medidos e rebaixamentos calculados no Poço da Mina na recuperação.

Tempo (min.)	Nível (m)	Reb. (m)	Reb. Corr. (m)	$(t+\tau)/t$	Tempo (min.)	Nível (m)	Reb. (m)	Reb. Corr. (m)	$(t+\tau)/t$
0,00	51,67	0,60	0,49	-	61,50	51,57	0,50	0,42	29,29
1,00	51,66	0,59	0,48	1741,00	71,67	51,56	0,49	0,41	25,28
2,00	51,65	0,58	0,47	871,00	83,33	51,55	0,48	0,41	21,88
3,00	51,65	0,58	0,47	581,00	93,67	51,54	0,47	0,40	19,58
4,00	51,65	0,58	0,47	436,00	108,00	51,53	0,46	0,39	17,11
5,00	51,64	0,57	0,47	349,00	122,00	51,52	0,45	0,39	15,26
12,67	51,63	0,56	0,46	138,37	139,00	51,51	0,44	0,38	13,52
20,42	51,62	0,55	0,46	86,22	145,00	51,50	0,43	0,37	13,00
26,42	51,61	0,54	0,45	66,87	178,00	51,49	0,42	0,36	10,78
33,83	51,60	0,53	0,44	52,43	370,00	51,40	0,33	0,30	5,70
42,67	51,59	0,52	0,44	41,78	1020,00	51,27	0,20	0,19	2,71
51,83	51,58	0,51	0,43	34,57					

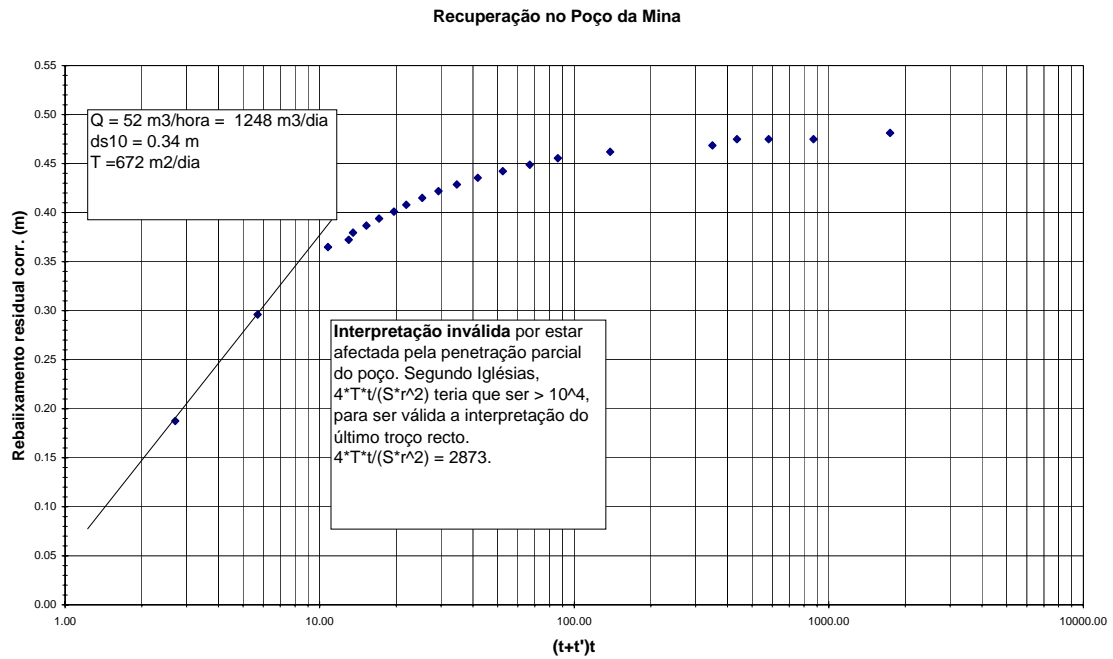


Figura 11.11 Projecção semilogarítmica dos rebaixamentos residuais (em recuperação)

Da forma enunciada fica explicada a aparente contradição entre os ensaios de bombagem e de recuperação.

Muito embora frequentemente seja mais fiável a interpretação da recuperação, por ser um ensaio mais robusto em relação a eventuais variações de caudal e outras ocorrências pontuais, neste caso é aconselhável adoptar o valor de transmissividade calculado a partir da bombagem.

11.3.2 Ensaio na Herdade das Cortes (Vale de Vargo)

Trata-se da origem de abastecimento público, da Câmara Municipal de Serpa, conhecida por “Herdade das Cortes”, próximo de Vale de Vargo.

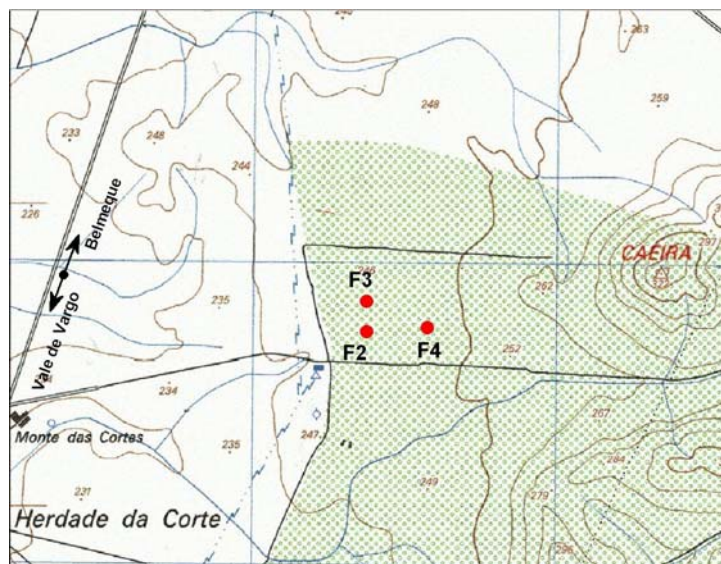


Figura 11.12 Local dos trabalhos (extracto da folha 524 da Carta Militar de Portugal, na escala 1/25.000)

Esta origem de água já foi abandonada, na sequência da construção e entrada em funcionamento da barragem do Enxoé, tendo posteriormente sido reactivada por manifesta falta de qualidade da água desta nova origem de água.

É um conjunto de três furos antigos, construídos em 1972 pela Tecnisonda, a que se vieram juntar outros, que foram abertos junto dos antigos. Sobre estes “novos furos” apenas se sabe que foram abertos no âmbito de medidas de “combate à seca”, em 1994/05, e afigura-se que nunca chegaram a constituir uma verdadeira alternativa, constituindo, isso sim, locais altamente vulneráveis para a contaminação do aquífero na zona.

Cada um dos furos antigos, com os números de inventário F2/524 (TS3), F3/524 (TS4) e F4/524 (TS6), foi ensaiado com caudal de 18 l/s, na ocasião da sua construção, sendo observadas as interferências causadas por cada bombagem. Através de cópias dos respectivos relatórios, foi possível fazer uma reinterpretção desses ensaios no sentido de avaliar as características hidráulicas do aquífero na zona. Apesar de não se terem encontrado as tabelas com as medições feitas, os gráficos apresentados permitiram a dedução do conjunto de valores que constam da Tabela 11.3.3.

Tabela 11.3.3 – Níveis e rebaixamentos calculados em Herdade das Cortes, nas bombagens.

20-3-1972 horas (F2)	Níveis (m)	Tempo (min.)	Reb. (m)	09-3-1972 horas (F3)	Níveis (m)	Tempo (min.)	Reb. (m)	21-2-1972 horas (F4)	Níveis (m)	Tempo (min.)	Reb. (m)
9:00	5,55	0	0.00	9:00	5,15	0	0.00	13:00	6,80	0	0.00
9:30	6,00	30	0.45	9:30	5,50	30	0.35	13:30	7,50	30	0.70
10:00	6,10	60	0.55	10:00	5,80	60	0.65	14:00	7,80	60	1.00
11:00	6,15	120	0.60	11:00	6,10	120	0.95	15:00	7,80	120	1.00
12:00	6,20	180	0.65	12:00	6,20	180	1.05	16:00	7,85	180	1.05
14:00	6,30	300	0.75	14:00	6,35	300	1.20	17:00	7,90	240	1.10
16:00	6,35	420	0.80	15:00	6,50	360	1.35	18:00	7,95	300	1.15
				16:00	6,60	420	1.45	20:00	7,98	420	1.18
				17:00	6,70	480	1.55	21:00	8,00	480	1.20
				18:00	6,75	540	1.60	22:00	8,01	540	1.21
				19:00	6,80	600	1.65	23:00	8,02	600	1.22
				20:00	6,82	660	1.67	0:00	8,05	660	1.25

A análise dos referidos gráficos permite constatar que, em cada uma das captações, existe um período inicial de variação de níveis, após o que estes tendem a “estabilizar”. Estes períodos iniciais, de 7, 9 e 11 horas, respectivamente para os furos F2/524, F4/524 e F3/524, possibilitam uma interpretação com vista à determinação da transmissividade em cada furo, considerando um regime transitório. Os níveis “estabilizados” de rebaixamento provocados pela bombagem em F2/512, permitem a interpretação em regime permanente, pelo método de Thiem, com vista à avaliação da transmissividade. As interferências em regime transitório, com vista à avaliação do coeficiente de armazenamento, não foram passíveis de avaliação devido a limitações de leitura dos gráficos.

De acordo com o exposto, são apresentados os dados dos furos F2, F3 e F4 na Tabela 11.3.4. Os resultados da interpretação pelo método de Jacob, tal como foi apresentado no capítulo 11.2.2.2, são apresentados no gráfico de interpretação da Figura 11.13.

Tabela 11.3.4 – Distâncias e rebaixamentos dos furos de Herdade das Cortes.

F2 bombagem	distâncias (m)	Reb. (m)
F2	0,2	0,8
F3	200	0,09
F4	200	0

A interpretação dos ensaios em regime permanente fornece valores de transmissividade sensivelmente superiores aos valores anteriormente encontrados (entre 290 e 962 m²/dia). Assim,

considerando o rebaixamento de 0,80 m, produzido na própria captação F2/524 pela bombagem, e o rebaixamento de 0,09 m produzido no furo F3/524, situado a uma distância de 200 m e admitindo um raio do furo de 0,2 m (o diâmetro de perfuração foi de 15”), e utilizando o método de Thiem, sabendo-se que o caudal foi 18 l/s, concluí-se que a transmissividade será 2405 m²/dia. Contudo, se for considerado o facto de a mesma bombagem não ter produzido qualquer rebaixamento no furo F4/524, que também se situa a 200 m do furo de bombagem, pode concluir-se que entre estes dois furos a transmissividade será menor ou igual a 2135 m²/dia. Se for considerado o facto de os rebaixamentos na própria captação poderem estar afectados por perdas de carga no próprio furo, a tendência seria para admitir valores superiores aos calculados.

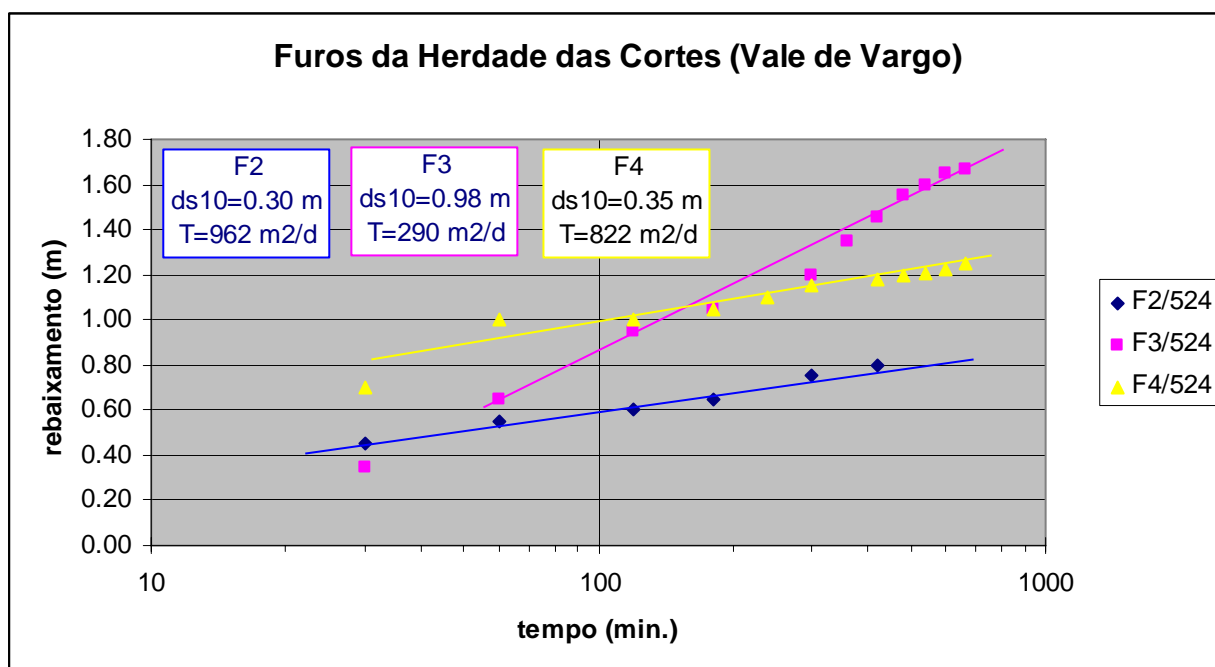


Figura 11.13 Gráfico semi-logarítmico e interpretação dos ensaios de bombagem nos três furos da Herdade das Cortes

11.3.3 Ensaio no Casal das Boieiras (Moura)

O local situa-se imediatamente a leste da cidade de Moura (Figura 11.14), onde se encontram os três furos de captação de água subterrânea com os n.ºs de inventário F24/501, F25/501 e F26/501. Foram adoptadas as designações simplificadas de F24, H25 e F26, para facilitar a distinção entre os furos em que se fizeram bombagens e o que apenas foi utilizado como piezómetro.

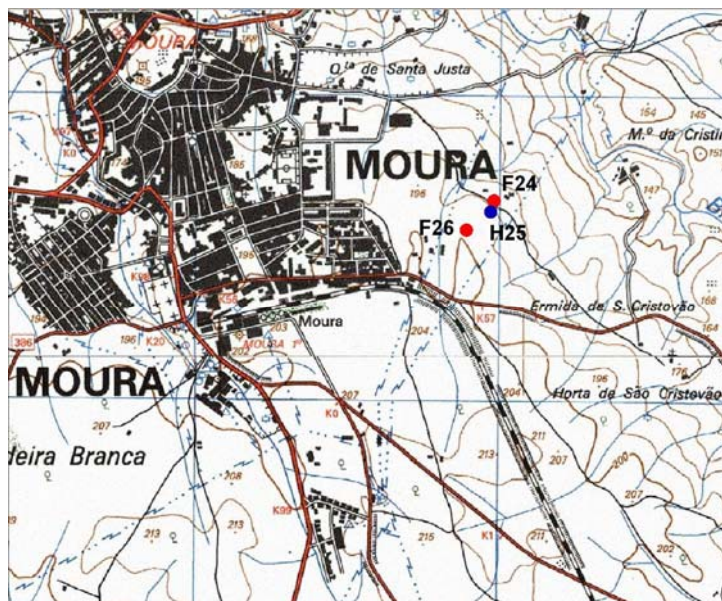


Figura 11.14 Local dos trabalhos (extracto das folhas 501 e 512 da Carta Militar de Portugal, na escala 1/25.000)

Os ensaios aqui realizados pretendiam interpretar algumas situações "estranhas" que se observaram no furo F26, como se refere no artigo "Características Hidrogeológicas dos Calcários de Moura" (Costa, 1992). A informação sobre a construção dos furos é muito escassa, sabendo-se apenas que foram entubados a PVC \varnothing 140 mm e 10 Kgf/cm² de resistência à pressão e que os drenos foram preparados mediante a "abertura de rasgos na coluna de PVC, com rebarbadora". As medições iniciais e os resultados do nivelamento relativo efectuado constam da Tabela 11.3.5, que destacam de imediato os gradientes "anormalmente" grandes que se observam em relação a F26. No que respeita às litologias atravessadas, apenas foi possível observar alguns detritos de perfuração do furo F26, o de construção mais recente, em que se identificaram metavulcanitos que devem pertencer ao *Complexo vulcano-sedimentar Ficalho-Moura*.

Segundo o proprietário deste furo, este, embora situado num local mais elevado, era repuxante quando acabou de ser construído e manteve-se a debitar um pequeno caudal durante vários meses, enquanto não foi equipado com uma bomba eléctrica submersível com um caudal esperado de cerca de 7,5 m³/h.

Tabela 11.3.5 – Características dos locais de observação piezométrica (Casal das Boeiras).

Designação	Profundidade (m)	Cotas relativas (m)	Nível inicial (m)	Potencial Hidráulico (m)	Distância a F24(m)	Gradiente hidráulico a F24	Distância a F26(m)	Gradiente hidráulico a F26
F24	40	95,51	3,74	91,77	-	-	97,0	-0,0970
H25	20	98,28	6,87	91,41	38,0	-0,0095	80,0	-0,1221
F26	70	103,18	2,00	101,18	97,0	+0,0970	-	-

Com as primeiras extracções de água, o furo deixou de ser repuxante, verificando-se que a bomba trabalhava intermitentemente por acção das sondas de nível de protecção da bomba. Nas palavras do proprietário "... após a água se esgotar, ouvia-se um borbulhar intenso acompanhado de «assobios». Antes da bomba voltar a trabalhar ouve-se água a correr no interior do furo.". Os ruídos observados resultam de se terem produzido rebaixamentos excessivos, que colocaram a descoberto zonas produtivas menos profundas. Após um primeiro ensaio com bombagem no furo F24 e controlo de níveis neste e nos outros dois furos, em que não se observaram quaisquer variações de nível em F26, fez-se um segundo ensaio com bombagem e controlo de níveis na própria captação, com o principal objectivo de esclarecer as dúvidas suscitadas pelo proprietário.

11.3.3.1 Ensaio com bombagem em F24

O caudal de bombagem, controlado por medição do tempo de enchimento de um recipiente aferido, foi constante e igual a 1,6 l/s. Como já foi referido não se observaram quaisquer rebaixamentos em F26, constando os rebaixamentos observados no furo de bombagem da Tabela 11.3.6.

Tabela 11.3.6 – Rebaixamentos em F24 durante a bombagem no próprio furo.

t (min)	reb. (m)	t (min)	reb. (m)	t (min)	reb. (m)
1	0,55	15	1,20	100	1,81
2	0,70	20	1,28	130	1,93
3	0,78	25	1,34	160	2,02
4	0,85	30	1,40	200	2,13
5	0,90	40	1,48	250	2,26
6	0,95	50	1,55	400	2,51
7	0,98	60	1,61	600	2,71
8	1,02	70	1,67	960	3,04
9	1,06	80	1,72	1110	3,13
10	1,08	90	1,77		

Na Tabela 11.3.7 são apresentadas os rebaixamentos observados no piezómetro H25 durante a bombagem em F24.

Tabela 11.3.7 - Rebaixamentos em H25 durante a bombagem de F24.

t (min)	reb. (m)	t (min)	reb. (m)	t (min)	reb. (m)
5	0,38	30	0,77	160	1,46
6	0,42	40	0,86	200	1,59
8	0,46	50	0,93	250	1,74
9	0,49	60	1,00	400	2,01
10	0,51	71	1,05	600	2,24
15	0,60	90	1,12	960	2,53
22	0,69	100	1,23	1110	2,62
25	0,73	130	1,36		

Na Figura 11.15 e na Figura 11.16 são apresentados os gráficos semilogarítmicos construídos para a interpretação do ensaio e o cálculo dos parâmetros hidráulicos. Ambos denunciam a existência de uma barreira hidráulica negativa, dado que se definem duas rectas, em que o declive da recta 2 é o dobro do declive da recta 1. São identificados os pontos excluídos e os pontos considerados no ajustamento a cada uma das rectas, pelo método dos mínimos quadrados. Os coeficientes de correlação (cc), declives (m) e transmissividades (T) calculadas (Equação 11.15) são apresentados na Tabela 11.3.8.

Com base no gráfico da Figura 11.16 foi ainda possível calcular o coeficiente de armazenamento ($S=8,51E-05$), utilizando a Equação 11.16. Também foi calculada a distância ao furo imagem ($r'=241$ m), utilizando a Equação 11.24. Apenas foram consideradas as medições dentro do período de validade da aproximação de Jacob (Equação 11.17), isto é, os pontos em que $t > 2,10$ minutos. Admitindo que a barreira se situará perpendicularmente à direcção definida por F24 e H25 e neste sentido, a barreira situar-se-á a 101,5 m do piezómetro e a 139,5 m do furo de bombagem.

Tabela 11.3.8 – Declives, coeficientes de correlação e transmissividades calculadas pelo método de Jacob.

	m	cc	T (m ² /d)
F24	0,62	0,997002	41,0
	1,25	0,997843	20,3
H25	0,68	0,997212	37,4
	1,36	0,999821	18,6

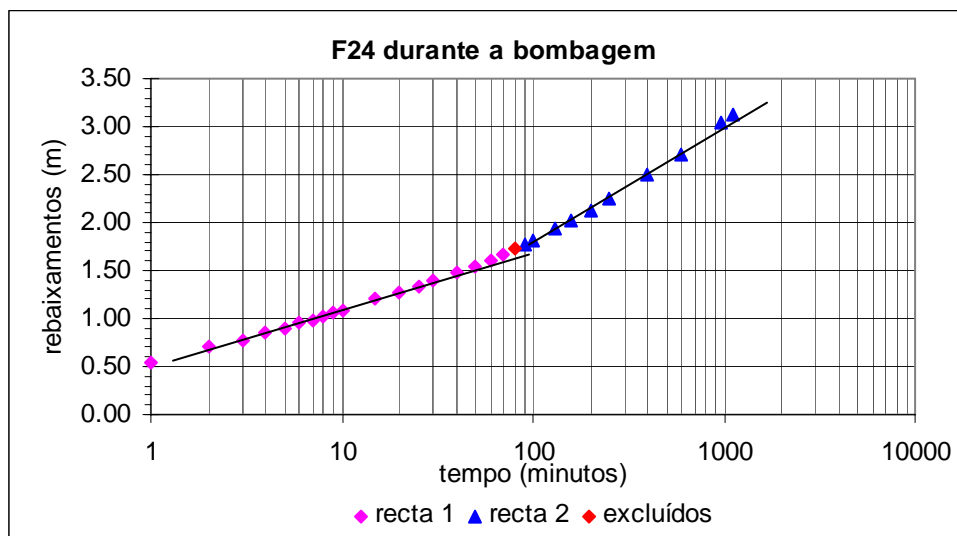


Figura 11.15 Rebaixamentos na própria captação durante a bombagem

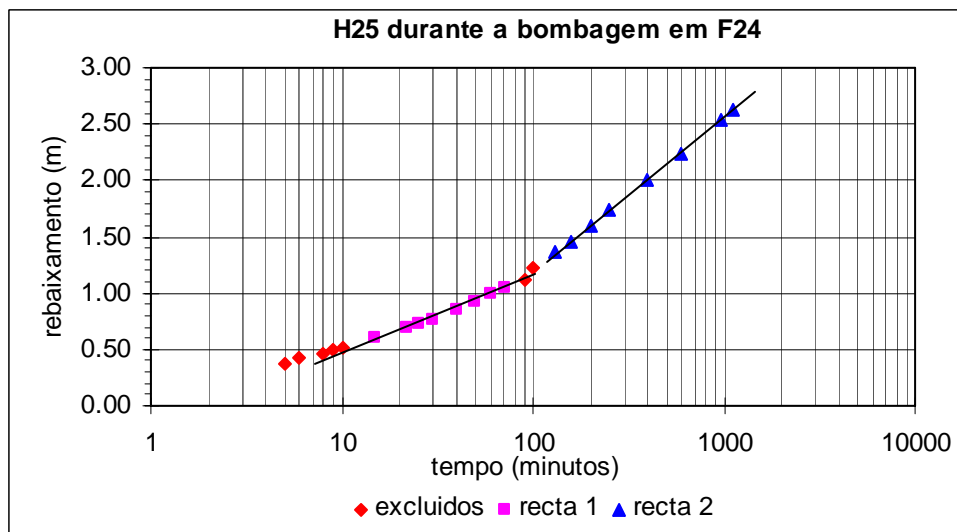


Figura 11.16 Rebaixamentos no piezômetro H25, durante a bombagem em F24

Os valores observados no piezômetro foram ainda introduzidos no programa do *Pumptest* (sem considerações quanto ao efeito de barreira), podendo os resultados ser confrontados com os anteriormente calculados (Tabela 11.3.9).

A recuperação de níveis nos dois furos foi também acompanhada. A evolução dos rebaixamentos residuais consta da Tabela 11.3.10.

Tabela 11.3.9 – Resultados do programa *Pumptest*.

	Jacob	Theis	Jacob(*)
T (m ² /d)=	21,9	23,6	37,4
S=	1,77E-04	1,49E-04	8,51E-05

(*) - Interpretado considerando o efeito de barreira

Tabela 11.3.10 – Rebaixamento residual em recuperação.

H25 Recuperação				F24 Recuperação			
t (min)	reb. (m)	t (min)	reb. (m)	t (min)	reb. (m)	t (min)	reb. (m)
0	2,62	16	1,96	0	3,13	16	1,91
1	2,58	18	1,9	1	2,71	17	1,88
2	2,47	20	1,88	2	2,73	18	1,85
3	2,42	25	1,78	3	2,56	19	1,83
4	2,35	35	1,74	4	2,46	20	1,81
5	2,29	50	1,48	5	2,37	25	1,7
6	2,25	80	1,24	6	2,3	35	1,55
7	2,21	111	1,07	7	2,23	50	1,39
8	2,18	140	0,95	11	2,09	80	1,17
9	2,14	275	0,6	12	2,02	111	1,02
10	2,1	-	-	13	2	140	0,9
12	2,06	-	-	14	1,96	275	0,59
14	2,00	-	-	15	1,93	-	-

A análise dos gráficos da Figura 11.17 e da Figura 11.18, denuncia também o efeito de barreira, contudo não foram utilizados os declives obtidos para o cálculo da transmissividade, pelas razões expostas no capítulo 11.2.3.

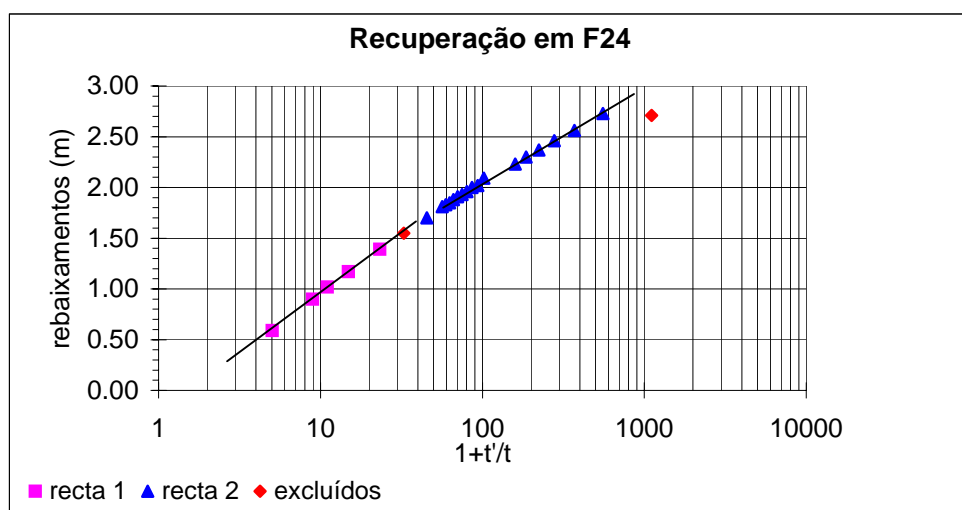


Figura 11.17 Níveis na captação F24, em recuperação

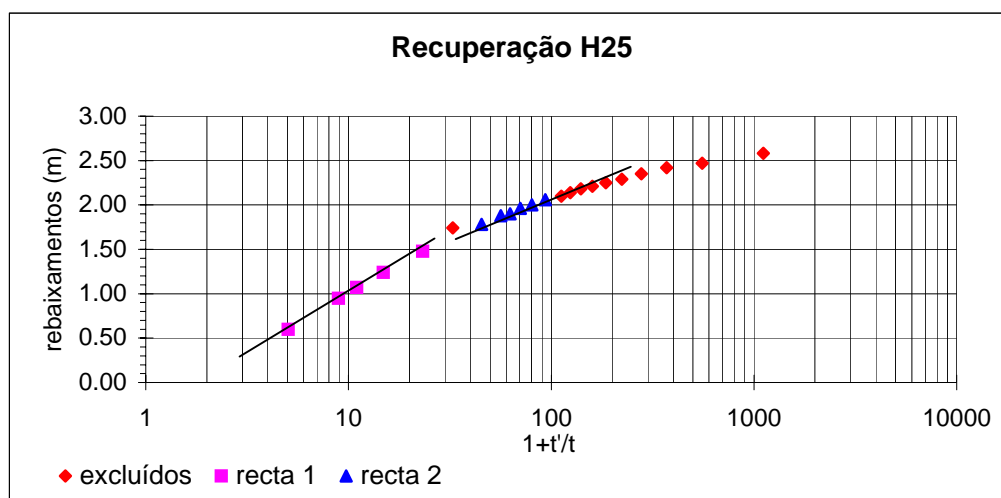


Figura 11.18 Níveis no piezómetro H25, em recuperação.

11.3.3.2 Ensaios com bombagem em F26

Os ensaios realizados neste furo tiveram como principal objectivo interpretar diversas particularidades que nele se observaram desde a sua construção, como foi referido anteriormente, em particular:

O artesianismo repuxante que deixou de apresentar em dada altura;

O facto de não apresentar quaisquer indícios de interferência com os outros dois furos;

Os ruídos que se produziam no interior deste furo.

Perante a evidência de este furo estar equipado com uma bomba sobredimensionada (7,5 m³/h) para a produtividade do furo, tentou-se estrangular o caudal de forma a evitar rebaixamentos excessivos. Nestas condições, tentou-se fazer um ensaio escalonado, mas apenas foi possível fazer bombagens com as características que se apresentam na Tabela 11.3.11, acompanhando-se, em seguida, a evolução da recuperação. No gráfico da Figura 11.19, apresenta-se esta recuperação, na forma habitual para a interpretação.

Tabela 11.3.11 – Bombagem em F26.

Duração (horas)	Caudal (m ³ /h)	Observações no final
0,5	1,26	Paragem de ± 5 minutos
1,0	1,26	Sem paragem
1,0	1,34	Sem paragem
1,0	7,20	Iniciou-se a recuperação

São representadas duas séries de pontos, sendo a do início da recuperação (maiores rebaixamentos) alinhada segundo uma recta, enquanto os pontos seguintes definem uma curva.

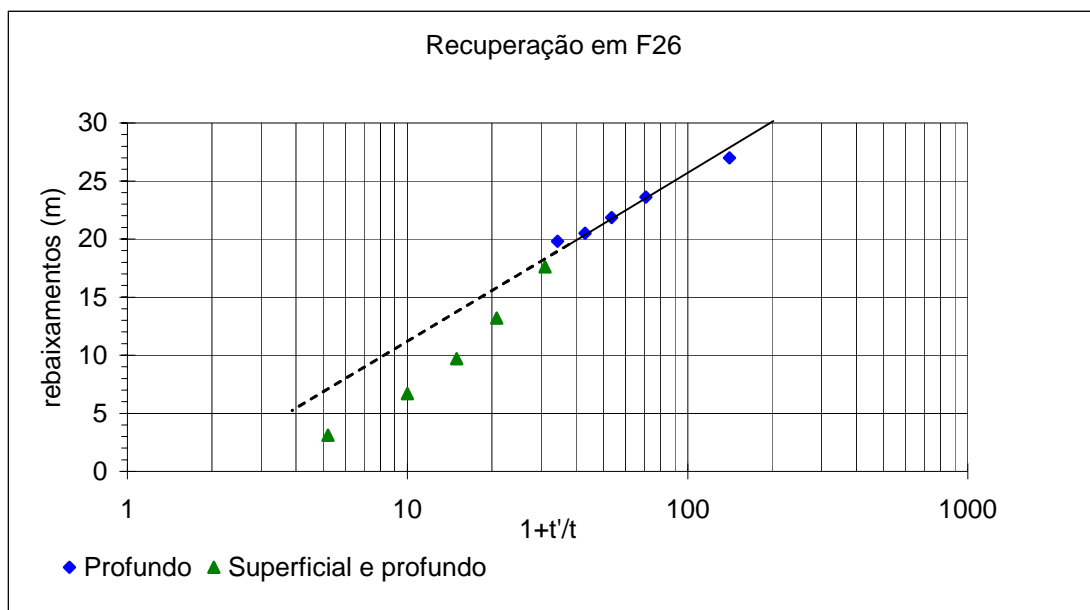


Figura 11.19 Recuperação em H26, após bombagem a caudal variável.

Na 1ª série (identificada na figura como "Profundo") predomina a recuperação do nível aquífero mais profundo, encontrando-se o nível aquífero superficial em situação de aquífero suspenso, pelo que apenas contribui com um reduzido caudal constante, resultante do efeito de gotejar de um aquífero suspenso. A sequência de pontos seguinte traduz uma interferência entre os dois níveis aquíferos. Uma vez atingida a base do aquífero (cerca dos 20 m), até então suspenso, este inicia a sua recuperação, pelo que o nível da água no furo começa a subir mais do que até então. O nível aquífero mais profundo deve ter uma transmissividade muito pequena, da ordem de $1 \text{ m}^2/\text{dia}$, calculado a partir do declive do trecho "Profundo" (13,8 m) e da média ponderada do caudal extraído ($3,26 \text{ m}^3/\text{h}$), por aplicação da Equação 11.15.

Considerando o nível em que se verificou a mudança de comportamento e o facto de se ter deixado de "ouvir água a correr no interior do furo" depois dos cinco minutos iniciais de recuperação, sugerem a hipótese de a base do nível aquífero superficial se situar entre os 22,66 e os 19,91 m de profundidade.

Na Figura 11.20 representa-se um corte interpretativo da situação existente sem bombagem.

O nível aquífero profundo pertence ao *Aquífero Moura-Ficalho*, que apresenta, regionalmente, um potencial hidráulico próximo da cota +190, enquanto o menos profundo corresponderá ao Aquífero dos «Calcários de Moura» (cota $\cong +170$).

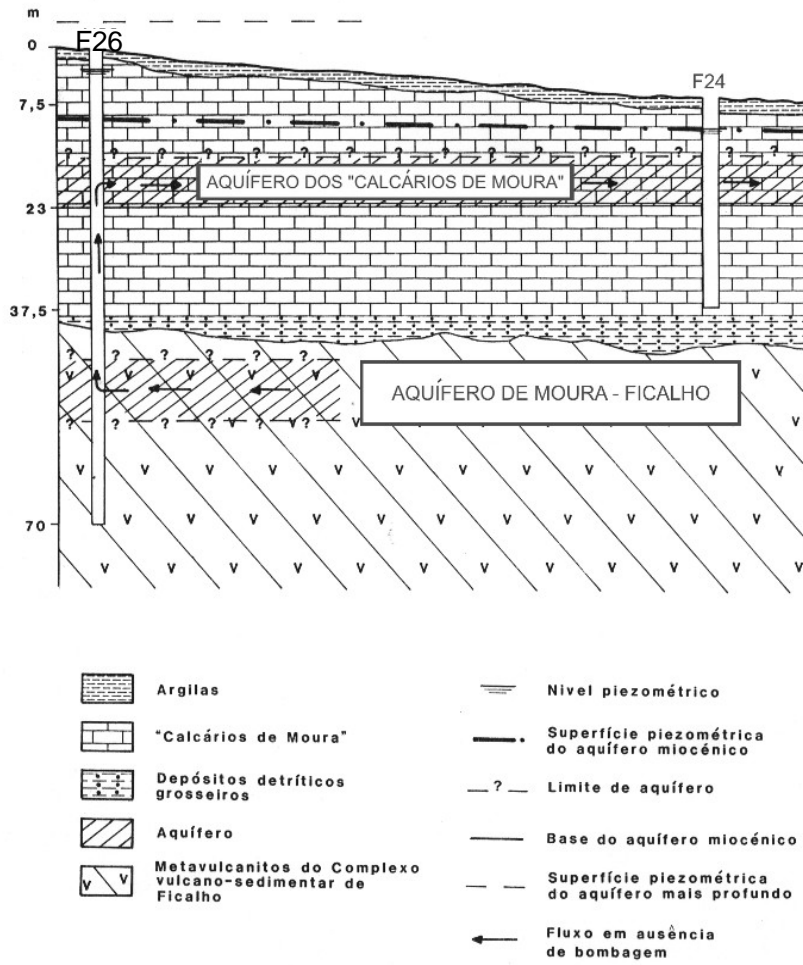


Figura 11.20 Perfil hidrogeológico interpretativo das condições existentes, na ausência de bombagens (adaptado de Costa, 1992).

11.3.4 Ensaio no Gargalão

Este local situa-se na zona de fecho do anticlinal, mergulhante para SE, da serra da Preguiça, onde esta estrutura é intersectada pela Ribeira de S. Pedro. Desta intersecção resulta uma das principais nascentes do Aquífero Moura-Ficalho, identificada como nascente do Gargalão. Trata-se de um conjunto de emergências dispersas, essencialmente ao longo do leito da ribeira. Os dois furos de captação, que constituem origens para o abastecimento público de Sobral da Adiça, situam-se na margem esquerda, a uma distância entre si de 16,30 metros. O local está assinalado com círculos coloridos na Figura 11.21.

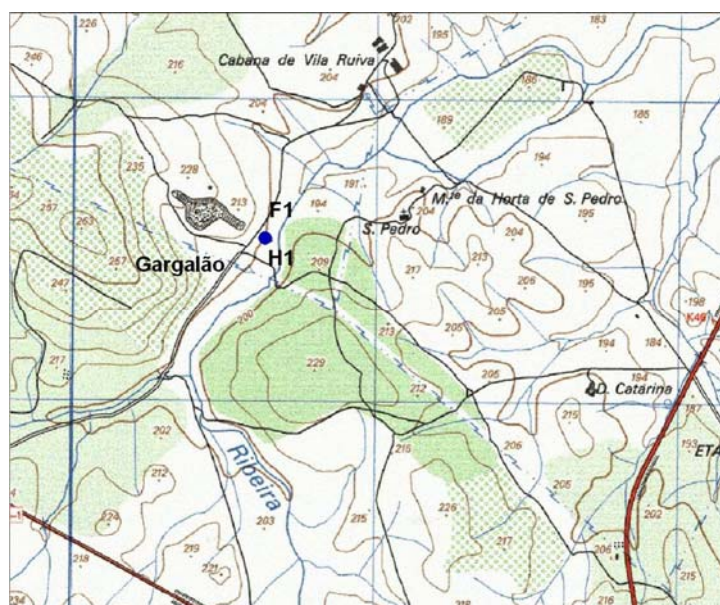


Figura 11.21 Localização das captações de Gargalão num extracto da carta militar n.º 524

A bombagem iniciou-se a 27 de Outubro de 1998, pelas 10:15 e terminou a 29 do mesmo mês, pelas 8 horas.

Acompanhou-se a posterior recuperação de níveis, quer no furo de bombagem (designado F1), quer no piezómetro (designado H1).

Os valores observados em F1, com o nível inicial de 4,41 m abaixo do rebordo do gargalo, constam da Tabela 11.3.12.

Os valores medidos referem-se a um caudal constante de 22,56 m³/h, controlado com contador.

Na interpretação foi utilizado o método de Jacob, para o que foi elaborado o gráfico da Figura 11.22. Neste podem ver-se os valores considerados no cálculo e os respectivos valores de transmissividade calculados (entre o mínimo de 223 m²/dia e o máximo de 707 m²/dia).

A forma “anormal” de alinhamento dos pontos repete-se na recuperação, no que respeita ao padrão de comportamento, como se pode observar na Figura 11.23. De facto continuam a definir-se vários troços rectos com diferentes declives. Esta situação, aliada às observações feitas no local, fazem supor a existência de “barreiras” hidráulicas diversas, constituindo um conjunto de tal forma complexo que se revelaram infrutíferos os esforços feitos para uma interpretação detalhada com base na “teoria das imagens”.

Tabela 11.3.12 – Níveis em F1 durante a bombagem.

Data	Tempo (min.)	NH F1 (m)	Rebaixa. (m)	Data	Tempo (min.)	NH F1 (m)	Rebaixa. (m)
27-10-1998 10:16	1,00	4,46	0,05	27-10-1998 11:40	85,00	5,15	0,74
27-10-1998 10:17	2,00	4,51	0,1	27-10-1998 11:45	90,00	5,17	0,76
27-10-1998 10:18	3,00	4,54	0,13	27-10-1998 11:50	95,00	5,18	0,77
27-10-1998 10:19	4,00	4,57	0,16	27-10-1998 11:55	100,00	5,19	0,78
27-10-1998 10:20	5,00	4,59	0,18	27-10-1998 12:15	120,00	5,23	0,82
27-10-1998 10:21	6,00	4,61	0,2	27-10-1998 12:35	140,00	5,26	0,85
27-10-1998 10:22	7,00	4,62	0,21	27-10-1998 12:55	160,00	5,28	0,87
27-10-1998 10:23	8,00	4,64	0,23	27-10-1998 13:15	180,00	5,30	0,89
27-10-1998 10:24	9,00	4,66	0,25	27-10-1998 13:35	200,00	5,32	0,91
27-10-1998 10:25	10,00	4,67	0,26	27-10-1998 14:25	250,00	5,35	0,94
27-10-1998 10:30	15,00	4,74	0,33	27-10-1998 15:15	300,00	5,36	0,95
27-10-1998 10:35	20,00	4,80	0,39	27-10-1998 16:05	350,00	5,38	0,97
27-10-1998 10:40	25,00	4,85	0,44	27-10-1998 17:45	450,00	5,39	0,98
27-10-1998 10:45	30,00	4,89	0,48	27-10-1998 18:35	500,00	5,39	0,98
27-10-1998 10:50	35,00	4,92	0,51	27-10-1998 19:25	550,00	5,39	0,98
27-10-1998 10:55	40,00	4,96	0,55	28-10-1998 0:03	828,00	5,42	1,01
27-10-1998 11:00	45,00	4,99	0,58	28-10-1998 8:35	1340,00	5,45	1,04
27-10-1998 11:05	50,00	5,01	0,6	28-10-1998 12:23	1568,00	5,46	1,05
27-10-1998 11:10	55,00	5,04	0,63	28-10-1998 15:20	1745,00	5,46	1,05
27-10-1998 11:15	60,00	5,07	0,66	28-10-1998 16:53	1838,00	5,45	1,04
27-10-1998 11:20	65,00	5,08	0,67	28-10-1998 18:00	1905,00	5,45	1,04
27-10-1998 11:25	70,00	5,10	0,69	28-10-1998 23:20	2225,00	5,45	1,04
27-10-1998 11:30	75,00	5,12	0,71	29-10-1998 8:00	2745,00	5,44	1,03
27-10-1998 11:35	80,00	5,14	0,73				

A complexidade geológica e hidrológica do local justificam os valores observados, mas inviabilizou uma interpretação mais detalhada. De facto há contactos geológicos, indícios de falhas, nascentes e um curso de água permanente, chamado Ribeira de S. Pedro, que tem origem neste local.

Verificou-se que, decorridos 21 minutos desde o início da bombagem, a fonte situada entre os furos e a ribeira deixou de correr (o caudal inicial medido era 2,5 l/s). Na ribeira não foi possível avaliar a redução de caudal, de que inicialmente se suspeitava, podendo apenas concluir-se que não terá havido uma redução significativa do caudal da ribeira de S. Pedro durante toda a bombagem. A

inexistência de um troço regularizado e de margens limpas de vegetação, tornaram o método de medição adoptado (micromolinete), insensível a quaisquer eventuais variações. O caudal foi avaliado em cerca de $70 \text{ m}^3/\text{h}$.

Bombagem F1 (Gargalão)

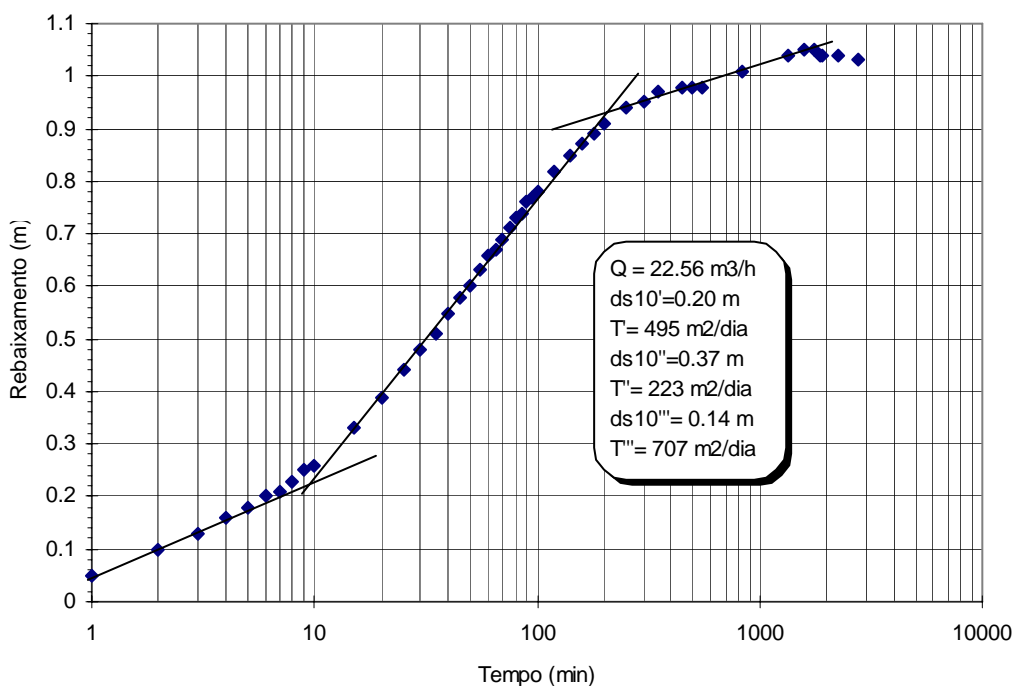


Figura 11.22 Interpretação da evolução de níveis, na bombagem, em F1.

A Tabela 11.3.13 e a Figura 11.23 apresentam os valores e interpretação da recuperação no furo F1.

Na Tabela 11.3.14 e Tabela 11.3.15 e na Figura 11.23 e Figura 11.24, encontram-se os valores medidos, respectivamente durante a bombagem e na recuperação, no furo H1, bem como as respectivas interpretações.

Apesar das dificuldades de que se reveste a interpretação dos valores obtidos, considera-se que a transmissividade resultante da interpretação dos efeitos da bombagem no piezómetro, terá um valor da ordem de $1415 \text{ m}^2/\text{dia}$ e um coeficiente de armazenamento da ordem de 0,20, devem ser os mais representativos da zona, embora se revelem heterogeneidades significativas. Para esta conclusão contribuiu também a análise da simulação do ensaio com um pequeno modelo Modflow 2000 preparado para este sector do aquífero, como se verá seguidamente.

Tabela 11.3.13 – Recuperação de níveis em F1.

Horas	Tempo (min.)	$(t+\tau)/t$	Reb. (m)	Horas	Tempo (min.)	$(t+\tau)/t$	Reb. (m)
10:36	1	2765,00	0,81	11:35	60	47,07	0,11
10:37	2	1383,00	0,69	11:40	65	43,52	0,10
10:38	3	922,33	0,65	11:45	70	40,49	0,09
10:39	4	692,00	0,63	11:50	75	37,85	0,08
10:40	5	553,80	0,61	11:55	80	35,55	0,08
10:41	6	461,67	0,60	12:00	85	33,52	0,07
10:42	7	395,86	0,60	12:05	90	31,71	0,07
10:43	8	346,50	0,59	12:10	95	30,09	0,06
10:44	9	308,11	0,59	12:15	100	28,64	0,06
10:45	10	277,40	0,58	12:35	120	24,03	0,05
10:50	15	185,27	0,57	12:55	140	20,74	0,03
10:55	20	139,20	0,52	13:15	160	18,28	0,03
11:00	25	111,56	0,45	13:35	180	16,36	0,03
11:05	30	93,13	0,37	13:55	200	14,82	0,03
11:10	35	79,97	0,29	14:45	250	12,06	0,02
11:15	40	70,10	0,23	15:35	300	10,21	0,02
11:20	45	62,42	0,17	16:25	350	8,90	0,01
11:25	50	56,28	0,14	17:15	400	7,91	0,00
11:30	55	51,25	0,12	18:15	460	7,01	0,00

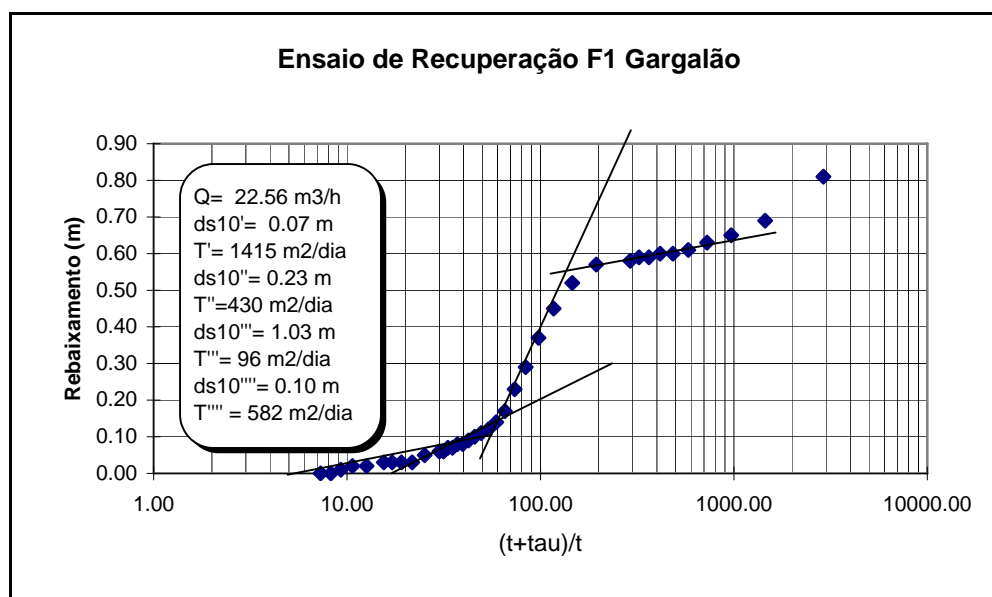


Figura 11.23 Interpretação da evolução de níveis, na recuperação, em F1

A recuperação (Figura 11.23), além de evidenciar essas heterogeneidades, evidencia ainda uma entrada de água no sistema, pois a recta de recuperação intersecta o eixo das abcissas, afastando-se significativamente da origem. Esta situação deve relacionar-se com possíveis troços influente da Ribeira de S. Pedro.

Tabela 11.3.14 – Níveis em H1 durante a bombagem em F1.

Horas	Tempo (min.)	NH H1	Reb. (m)	Horas	Tempo (min.)	Reb. (m)	NH H1
10:16	1	4 485	0,00	12:57	162	0,05	4,54
10:17	2	4 485	0,00	13:17	182	0,05	4,54
10:18	3	4 485	0,00	13:36	201	0,06	4,55
10:19	4	4 485	0,00	14:28	253	0,07	4,56
10:20	5	4 485	0,00	16:07	352	0,08	4,57
10:21	6	4 485	0,00	17:18	423	0,08	4,57
10:22	7	4 485	0,00	18:37	502	0,09	4,58
10:23	8	4 485	0,00	00:06	831	0,10	4,59
10:24	9	4 485	0,00	08:36	1341	0,11	4,61
10:25	10	4,490	0,00	12:25	1570	0,12	4,62
10:45	30	4,50	0,01	15:21	1746	0,12	4,62
11:06	51	4,50	0,01	18:00	1905	0,11	4,61
11:32	77	4,51	0,02	23:23	2182	0,11	4,61
12:00	105	4,52	0,03	08:00	2699	0,12	4 605
12:28	133	4,53	0,04				

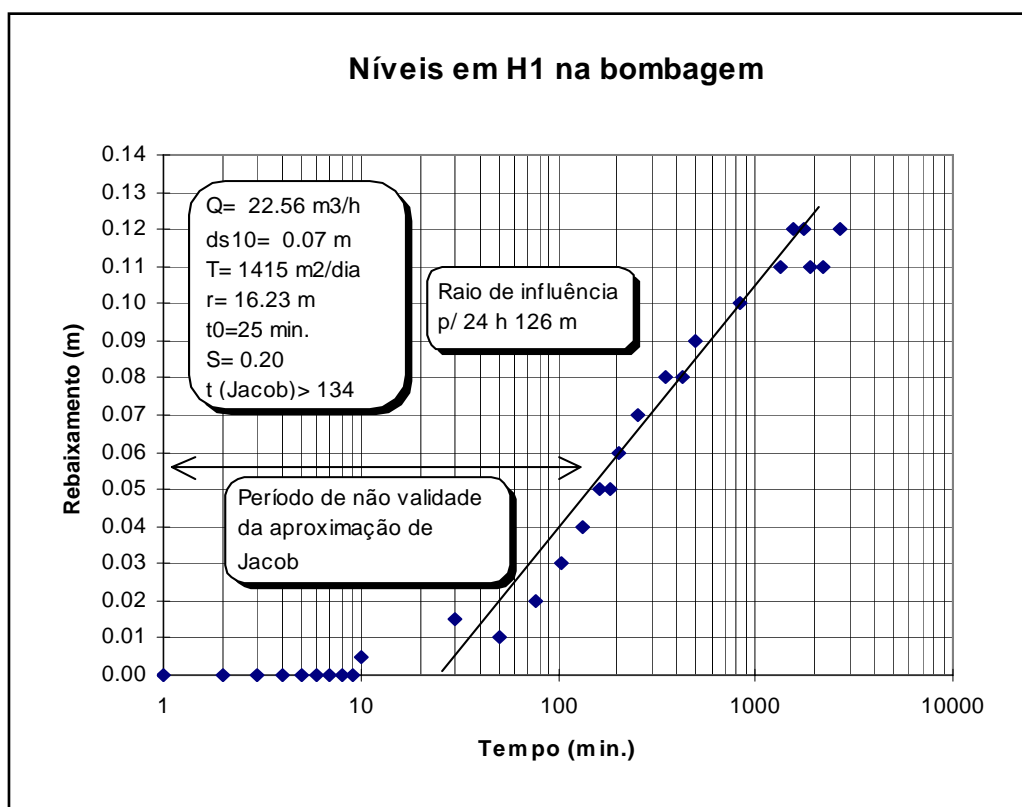


Figura 11.24 Interpretação da evolução de níveis na bombagem de F1, em H1.

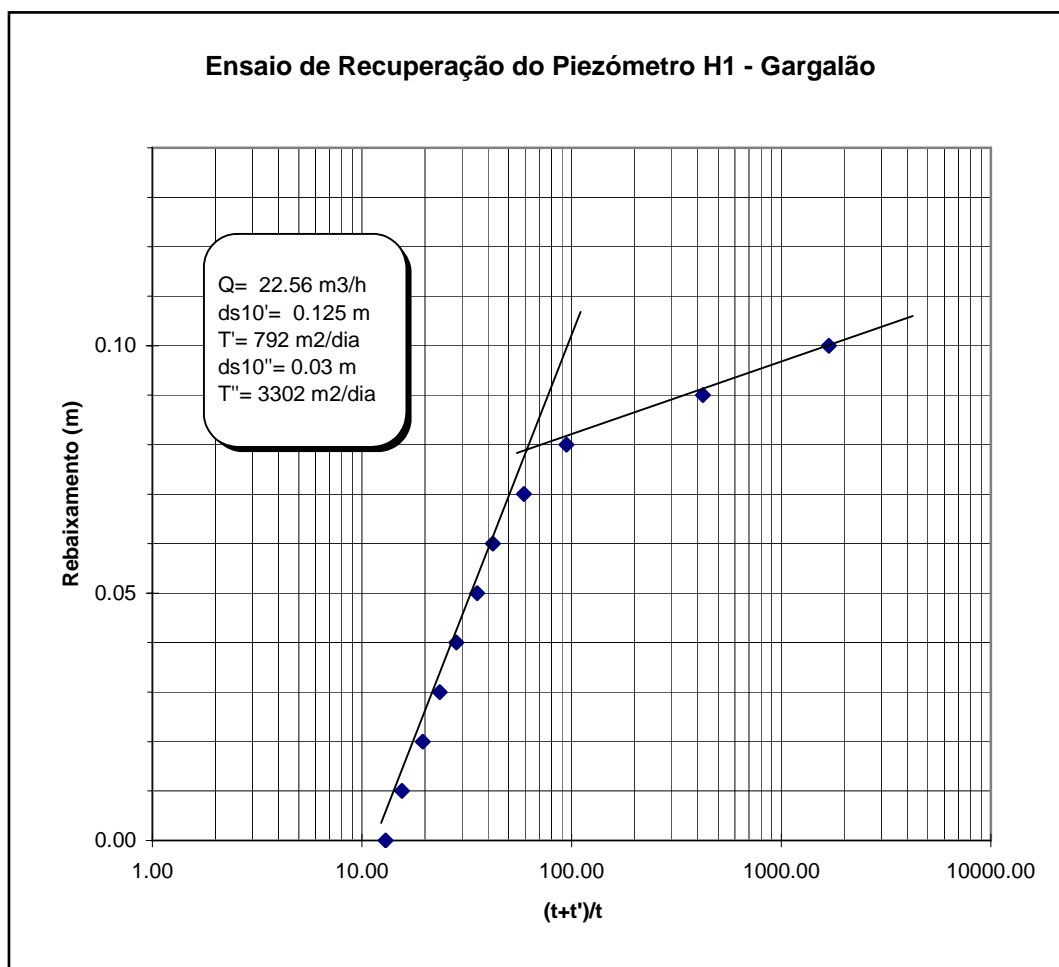


Figura 11.25 Interpretação da evolução de níveis na recuperação, em H1

Uma vez que este ensaio teve também como objectivo obter informação sobre o regime de exploração adequado para este sistema de captação, calculou-se o raio de influência resultante de uma bombagem de 24 horas em apenas um furo, de acordo com o regime que tem sido praticado neste sistema, chegando-se ao valor de 126 metros.

Tabela 11.3.15 – Recuperação de níveis em H1 (Gargalão).

Horas	Tempo (min.)	$(t+\tau)/t$	Reb. (m)	Horas	Tempo (min.)	$(t+\tau)/t$	Reb. (m)
10:36	1	1687,00	0,10	12:06	91	19,53	0,02
10:39	4	422,50	0,09	12:31	116	15,53	0,01
10:53	18	94,67	0,08	12:56	141	12,96	0,00
11:04	29	59,14	0,07	13:42	187	10,02	-0,01
11:16	41	42,12	0,06	14:30	232	8,27	-0,02
11:24	49	35,41	0,05	14:58	260	7,48	-0,03
11:37	62	28,19	0,04	16:30	382	5,41	-0,04
11:50	75	23,48	0,03				

Como foi anteriormente referido, desenvolveu-se um pequeno modelo de escoamento em regime transitório para este sector do aquífero Moura-Ficalho e para as observações efectuadas durante estes ensaios.

O modelo conceptual que nessa ocasião havia para esta zona, admitia que o escoamento subterrâneo se fazia segundo a direcção do eixo da dobra, de NW para SE, em direcção a uma das principais descargas naturais do aquífero identificadas (nascente de Gargalão). Posteriormente verificou-se que as coisas não são tão simples e que, além desta descarga natural visível, existirão descargas ocultas ao longo do flanco NE da dobra da Preguiça. Assim, como se verá, o escoamento neste sector do aquífero faz-se para SE, mas também para NE, tendo como resultante uma direcção de escoamento neste local próxima de E-W. Mesmo não sendo conceptualmente totalmente correcto, apresenta-se na Figura 11.26 as condições de fronteira e a disposição relativa dos principais elementos intervenientes nos ensaios. Representa-se as linhas piezométricas com equidistância de 0,5 m.

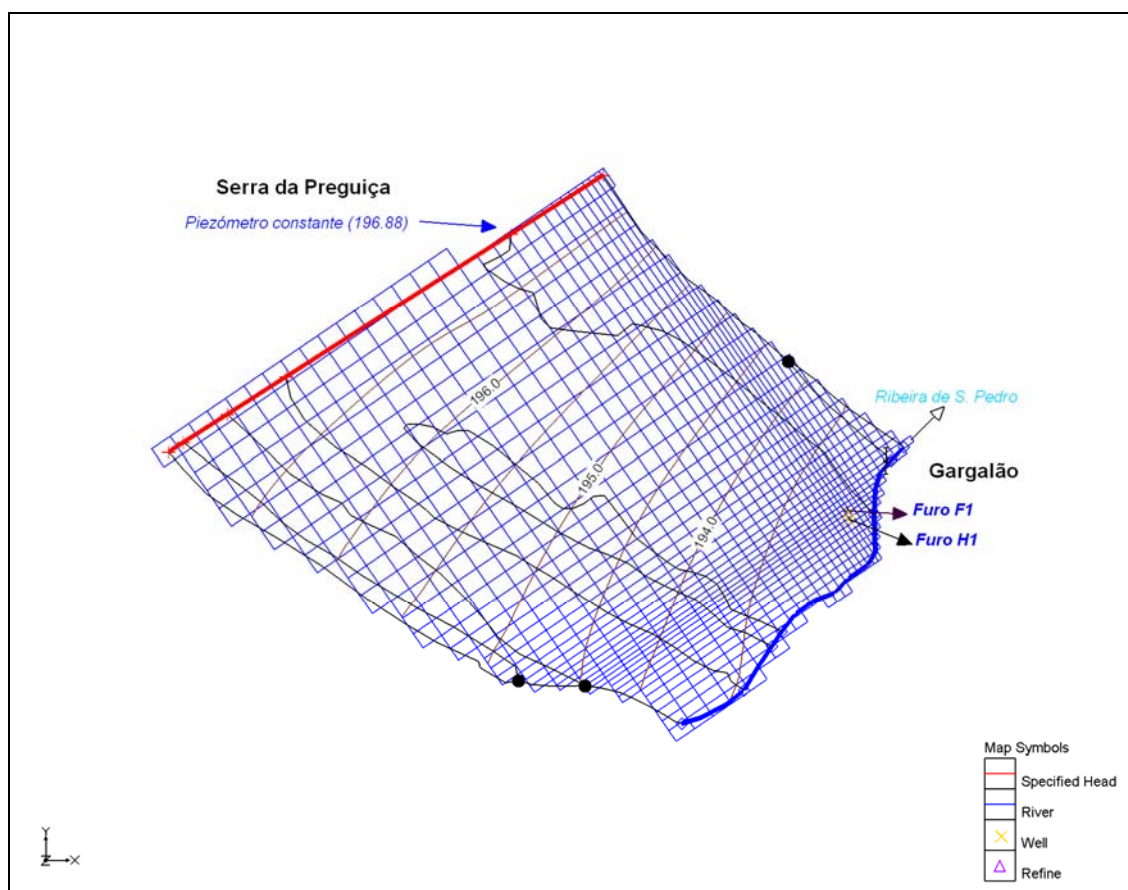


Figura 11.26 Simulação do escoamento e condições de fronteira no final da bombagem em F1

Verificou-se durante o ensaio que o nível não foi afectado num piezómetro situado na serra da Preguiça (assinalado na figura como *Piezómetro constante*). Foram considerados os resultados do levantamento topográfico da zona, incluindo vários pontos cotados ao longo da Ribeira de S. Pedro. De acordo com este modelo, em que foi considerada um $S= 0,20$ e um $T= 1000 \text{ m}^2/\text{dia}$, o escoamento da ribeira teria variado da forma representada no gráfico da Figura 11.27.

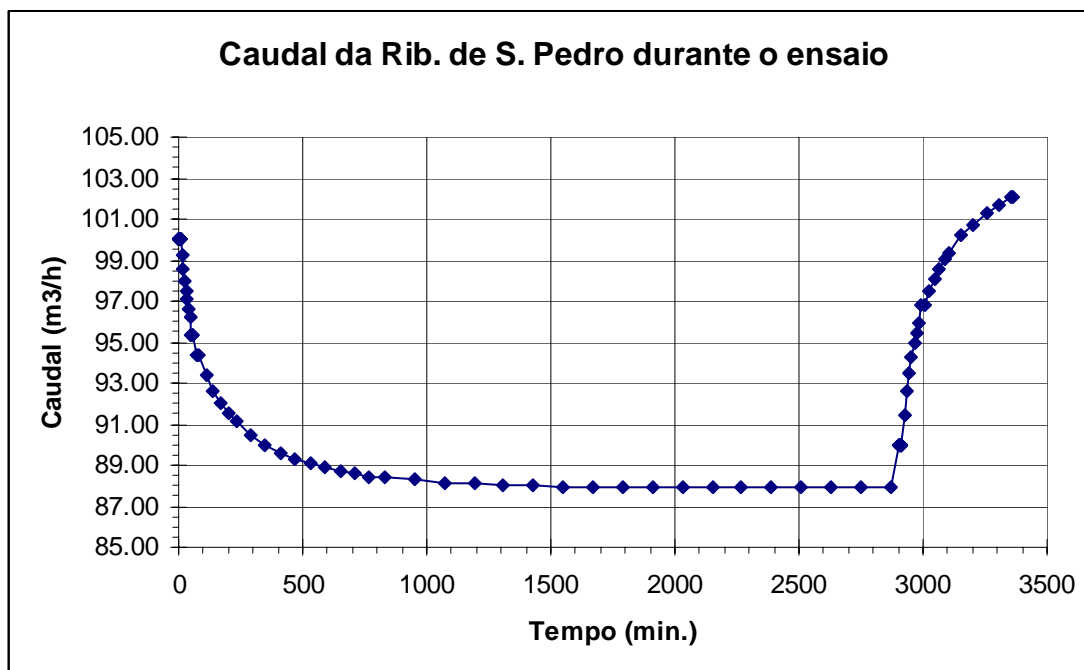


Figura 11.27 Simulação do escoamento da Ribeira de S. Pedro durante os ensaios de bombagem e recuperação

A evolução de níveis em F1 e no piezómetro H1, segundo o mesmo modelo, seria a representada na Figura 11.28 e na Figura 11.29, onde se representa a tracejado a curva das medições feitas. Como se pode constatar os níveis simulados são sempre bastante inferiores aos valores observados e, tanto o caudal da ribeira como a sua variação, também devem ser exagerados. Depois de várias tentativas no sentido de calibrar o modelo local criado, concluiu-se que este não é adequado para estas condições locais. Como foi referido a calibração do modelo regional também veio modificar o modelo conceptual neste sector do aquífero, revelando-se a necessidade de considerar descargas naturais ocultas no flanco NE da serra da Preguiça, significando que o escoamento não se faz exclusivamente em direcção à Ribeira de S. Pedro, segundo o eixo da dobra, havendo fluxos importantes para o quadrante leste, transversais a esta estrutura geológica.

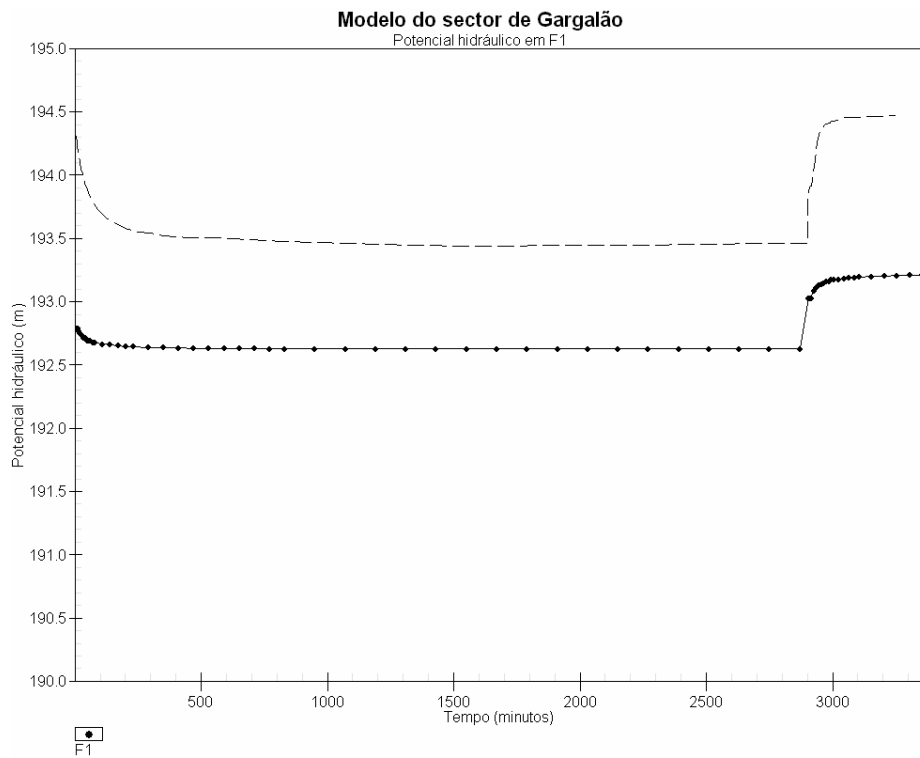


Figura 11.28 - Evolução de níveis em F1, com indicação das medições a tracejado

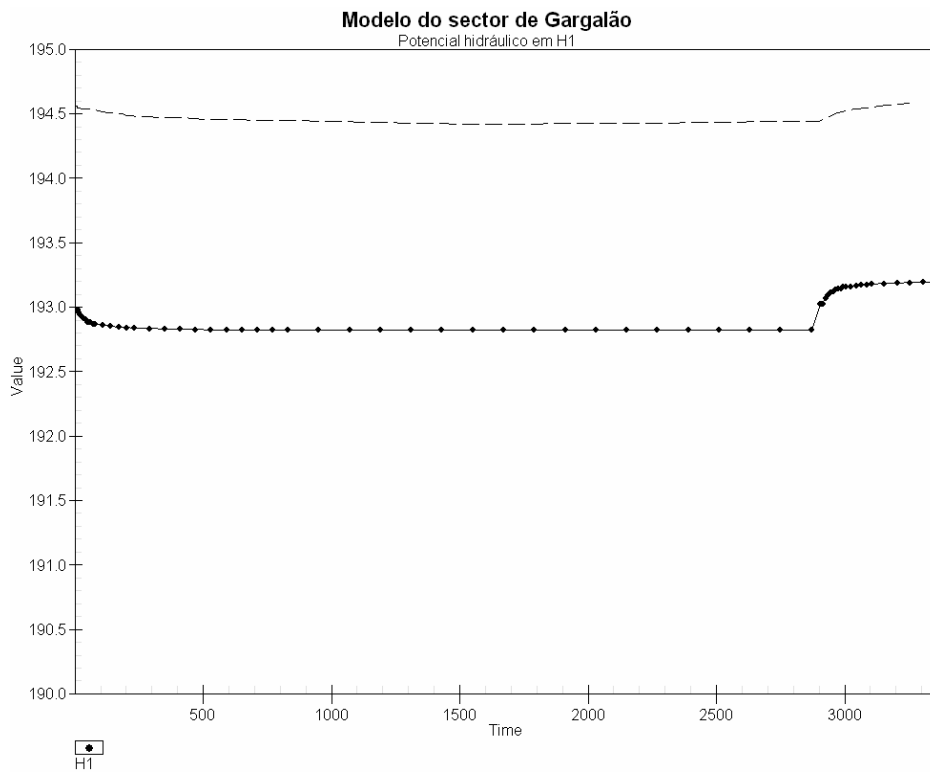


Figura 11.29 - Evolução de níveis em H1, com indicação das medições a tracejado

11.3.5 Ensaio em Fonte da Telha

A Fonte da Telha é o local de captação de água para o abastecimento público da cidade de Moura. Até à actualidade o abastecimento tem sido assegurado por um conjunto de três furos de captação, construídos em 1953 pela firma J. Keller. Os dois furos francamente mais produtivos, com os números de inventário F4/512 e F5/512, correspondentes às designações JK4 e JK6, respectivamente, situam-se a escassos 0,85 m de distância entre si. O furo mais afastado (JK5), com a designação de inventário F3/512, situa-se a 13,10 m de distância de F5/512, e é muito menos produtivo do que os anteriores (caudais de exploração de 30 m³/h contra 180 m³/h, de qualquer um dos outros).

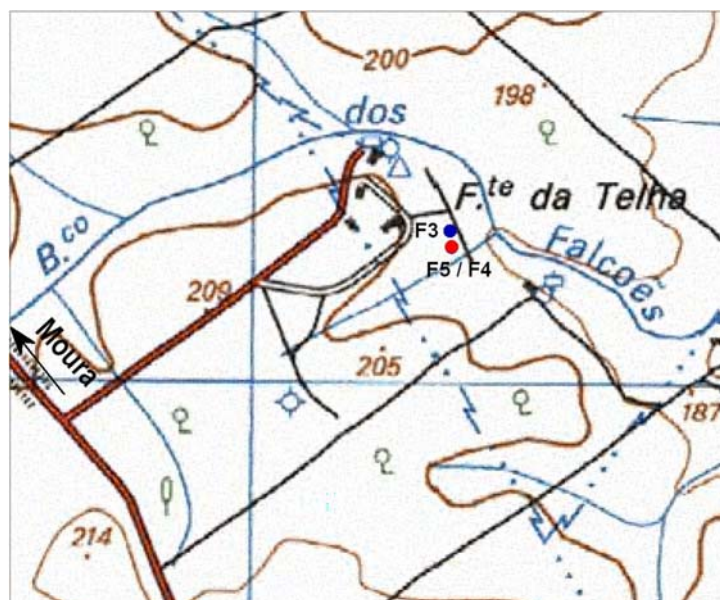


Figura 11.30 Localização dos furos de abastecimento da Fonte da Telha (extracto da folha 512 da Carta Militar 1/25.000, ampliada para a escala 1/10.000)

Os dois furos mais importantes para o abastecimento têm a profundidade de 26 m, com ralos situados a partir dos 12,35 metros de profundidade. Nestas condições o abastecimento público da cidade poderia ser posto em causa em qualquer situação de rebaixamento significativo de níveis na zona, o que nunca se verificou. Actualmente já existe um novo pólo de captação, do lado oposto do Barranco dos Falcões, constituído por dois novos furos e um terceiro para monitorização de níveis, que foram construídos em 2004, na sequência de prospecção geológica e geofísica em que também colaboraram a Prof.^a Amélia Dill e o Dr. Victor de Oliveira.

Dado o funcionamento praticamente ininterrupto destes furos, a única informação disponível é a que consta dos relatórios técnicos de construção dos furos.

Com base nesses dados sobre níveis e caudal, foi possível elaborar o gráfico da Figura 11.31. Neste pode verificar-se que F5 corresponde a um rebaixamento superior ao que corresponderia ao alinhamento definido pelos dois outros furos. Este incremento de rebaixamento no furo de bombagem deve corresponder a perdas de carga na própria captação, aliás pequenas (0,33 m). Nas condições antes referidas, a utilização da formulação apresentada no item 11.2.1, permitiu calcular a transmissividade de 3514 m²/dia e o raio de influência da captação F5/512 de 16,8 m.

Tabela 11.3.16 – Níveis estáticos e dinâmicos nos furos antigos de Fonte da Telha.

	NH0 (m)	ND (m)	Reb.(m)	Dist. (m)
F3/512	3,96	4,01	0,05	13,10
F4/512	3,50	4,10	0,60	0,85
F5/512(*)	3,50	4,78	1,28	0,15

(*)- Furo de bombagem

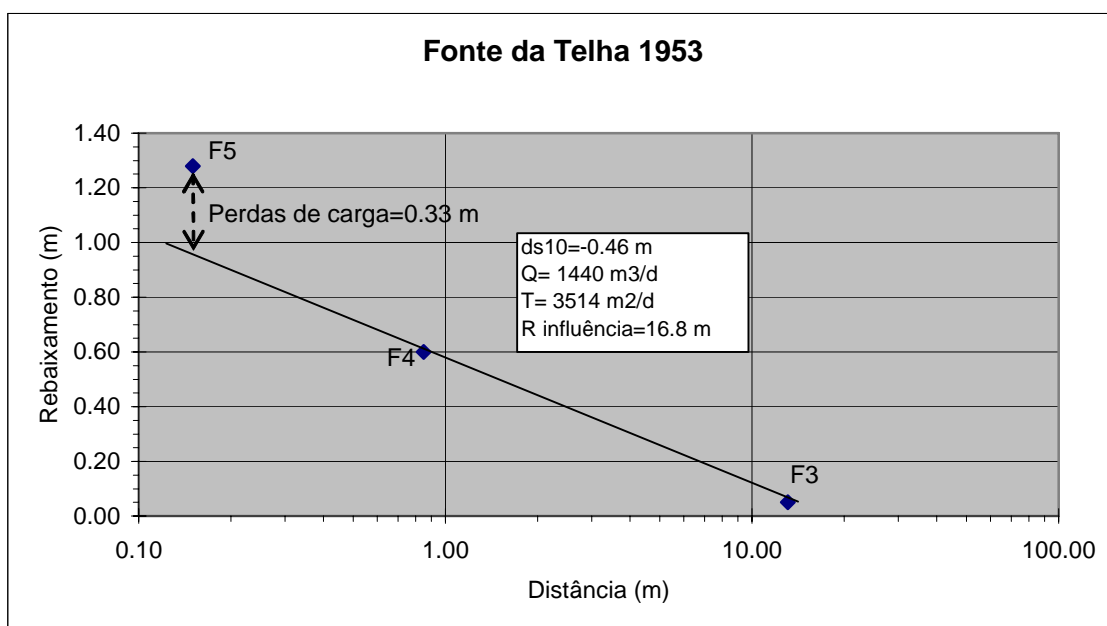


Figura 11.31 Interpretação de ensaio em regime estacionário pelo método de Thiem

11.3.6 Ensaio no Casal de Santo André (SDM11)

O Casal de Santo André situa-se a cerca de 1,5 km a SE de Moura. Neste local realizou-se uma sondagem de prospecção mineira, à rotação com carotagem contínua, designada SDM11. Uma vez que intersectou níveis aquíferos repuxantes, a sondagem foi aproveitada como captação equipada com uma torneira de esfera, sendo-lhe atribuído o número de inventário F28/512. Desde então tem sido utilizado na rega de uma pequena horta, mantendo-se normalmente em funcionamento permanente.

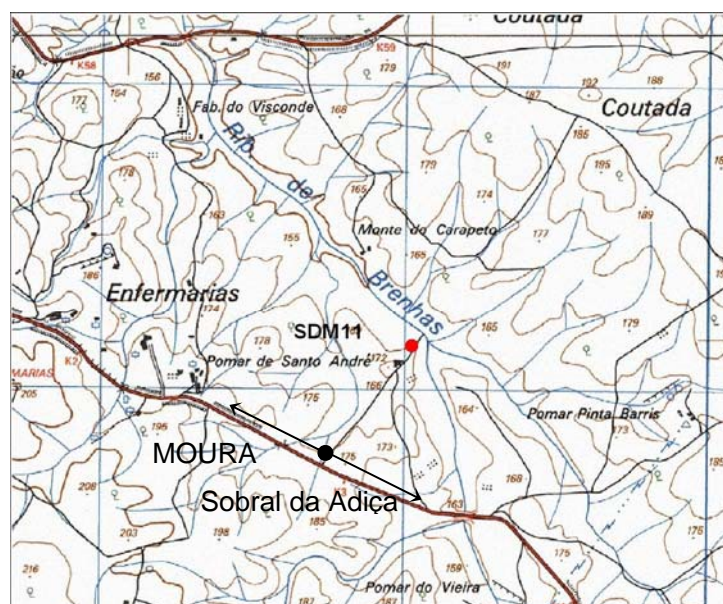


Figura 11.32 Local dos trabalhos (extracto da folha 512 da Carta Militar de Portugal, na escala 1/25.000)

Trata-se de um furo com um caudal de 1 a 2 l/s, repuxante, que intersectou a primeira e mais importante abertura do tipo geode com revestimento de cristais de quartzo, a 389,5 m de profundidade, ao nível das "Dolomias de Ficalho" (V. Oliveira, informação oral). A cota aproximada da boca da sondagem é +155 m e o furo está entubado a ferro, com tubo cego até aos 152 m de profundidade, encontrando-se em *open hole* a partir desta profundidade.

Por se tratar de uma sondagem mineira, o diâmetro é reduzido pelo que se avaliou a permeabilidade sem recurso a qualquer bombagem. Neste caso, como foi descrito na secção 11.2.3, foi utilizado o método de Ferris no cálculo da transmissividade e do coeficiente de armazenamento (Equação 11.28 e Equação 11.29, respectivamente).

O procedimento consistiu em tapar completamente a boca da sondagem e medir a pressão máxima atingida na recuperação. Inicia-se então o acompanhamento da evolução do caudal ao longo do

tempo. O parâmetro medido foi o n.º de revoluções do hélice de um micromolinete instalado no interior do tubo de descarga do furo. A secção desta descarga foi sempre constante e o regime de escoamento foi sempre laminar, pelo que existe uma relação linear entre o n.º de revoluções em cada 30 segundos e o caudal (Costa, 1988).

Procedeu-se a uma reinterpretação, com base em modelos de fluxo locais, das observações que constam da publicação antes referida, concluindo-se quanto à validade e limitações do método semi-analítico utilizado (método de Ferris) e quanto a algumas particularidades hidráulicas do aquífero Moura-Ficalho.

Interpretação com um modelo Modflow 2000

Criou-se um modelo definido como uma malha de células de espessura constante de 10 m e lados variáveis entre 1 e 20 m. O refinamento situa-se no centro da malha, onde se localiza a sondagem SDM-11, como se mostra na Figura 11.33. A sondagem foi simulada como uma célula de potencial constante (cota +155) e analisando o caudal que sai por esta célula. Toda a envolvente foi considerada uma *General Head Boundary*, com potencial hidráulico +190, que define uma área quadrada de 5 quilómetros de lado.

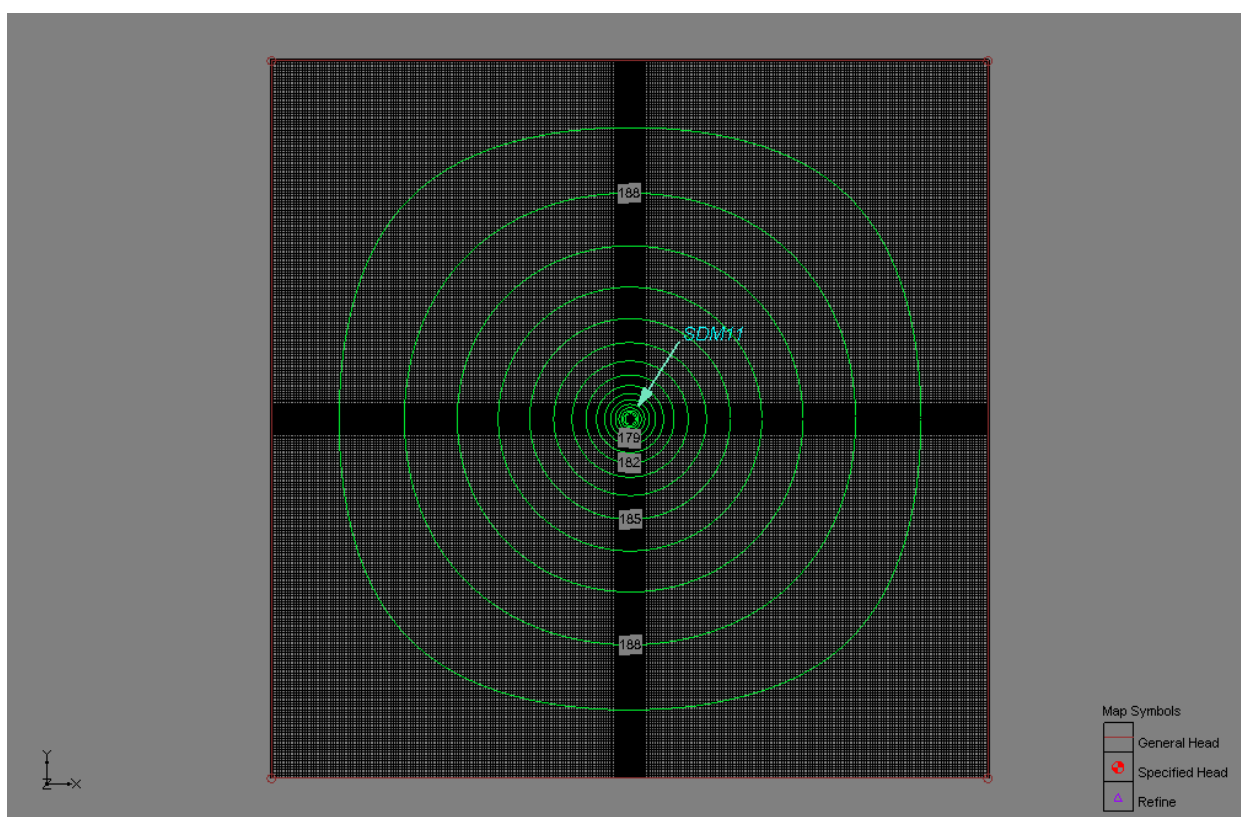


Figura 11.33 Linhas piezométricas do modelo SDM_0, em regime permanente

Primeiramente, fez-se a simulação de escoamento em regime permanente considerando o valor de permeabilidade que resultou da interpretação analítica do ensaio, isto é:

$T = 30,5 \text{ m}^2/\text{d}$; $b = 10 \text{ m}$; $K = 0,0021180556 \text{ m}/\text{minuto}$.

O resultado obtido com o modelo *SDM_0* foi um caudal na sondagem de $-0,4859791 \text{ m}^3/\text{min.}$, enquanto o valor observado foi $-0,112230152 \text{ m}^3/\text{min.}$ (caudal medido no final do ensaio).

Posteriormente fez-se a simulação inversa, com o código PEST, para optimização da condutividade horizontal com a técnica dos *pilot points*, conseguindo-se que o valor de caudal simulado ($-0,112414 \text{ m}^3/\text{min.}$) praticamente igualasse o caudal observado (modelo *SDM_0R*).

A Figura 11.34 representa a distribuição espacial de transmissividade resultante da optimização feita em regime permanente. Destaca-se o facto de a transmissividade nas imediações da sondagem se situar abaixo dos $8 \text{ m}^2/\text{dia}$. Os valores superiores situam-se em áreas mais distantes.

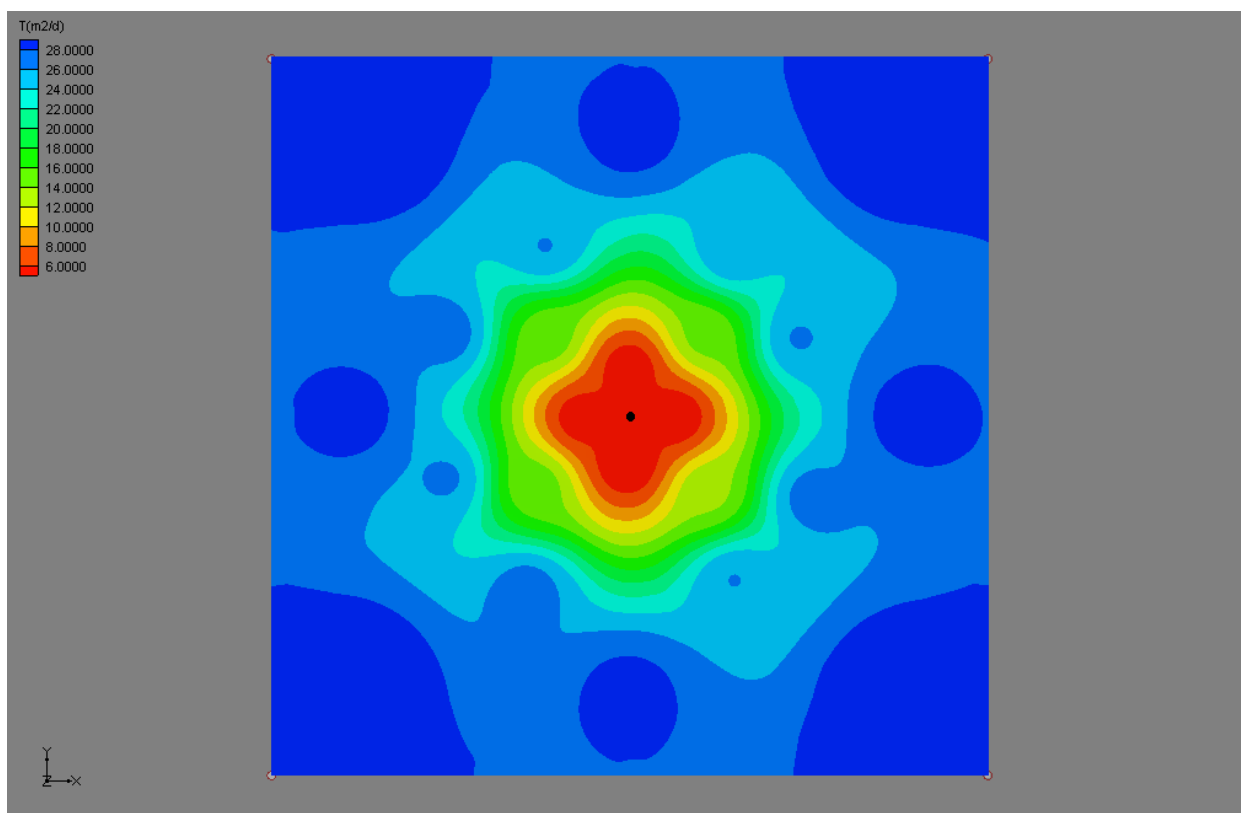


Figura 11.34 Transmissividade no domínio de simulação calculada por modelação inversa em regime permanente com o modelo *SDM_0R*

Seguidamente, fez-se a simulação em regime transitório, para o que foram definidos 3 domínios aproximadamente concêntricos para os quais foram admitidos diferentes valores de coeficiente de armazenamento. Numa primeira abordagem foi admitida a distribuição espacial de condutividade

hidráulica resultante do modelo em regime permanente (implícita na Figura 11.34), contudo o caudal resultante na célula central de potencial constante é significativamente inferior e menos variável do que o observado, como se pode constatar no gráfico da Figura 11.35 (modelo *SDM_T0*).

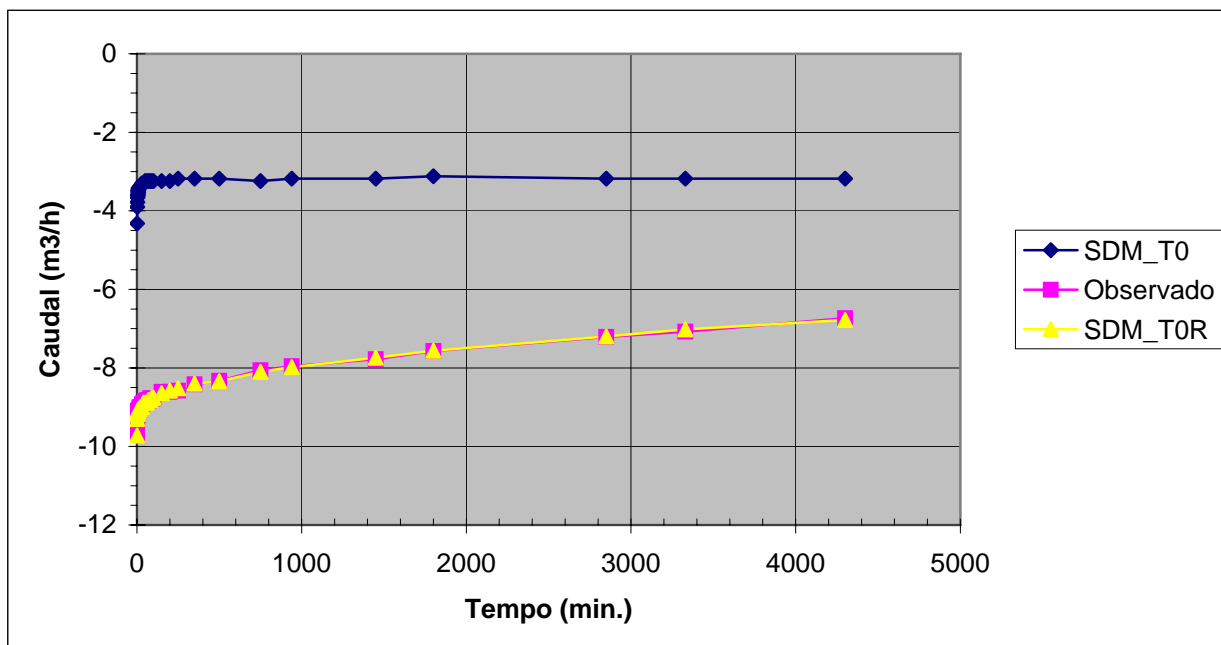


Figura 11.35 Variação de caudal observada e simulada na sondagem *SDM11*, com base nos modelos *SDM_T0* e *SDM_T0R*

Fez-se então a otimização da calibração do modelo, utilizando o *PEST*. Estimaram-se valores para o coeficiente de armazenamento (*S*) nos três domínios definidos e para a condutividade hidráulica em todo o domínio de modelação, neste caso com a técnica dos *pilot points*. Na Figura 11.36 representa-se os valores otimizados da transmissividade e do coeficiente de armazenamento. Na Tabela 11.3.17 constam os valores observados e simulados, podendo constatar-se o bom ajuste alcançado com o modelo *SDM_T0R*.

O trabalho de simulação desenvolvido sobre este ensaio fundamenta as seguintes conclusões: É possível encontrar condições de heterogeneidade hidráulica do aquífero que justificam o comportamento observado neste ensaio. É claro que os modelos desenvolvidos são simplificações de uma realidade seguramente bem mais complexa.

A interpretação do ensaio pelo método de Ferris (Costa, 1988) sobrevalorizou a transmissividade, dado que se afigura mais provável um valor de 7 a 8 m²/dia em vez de 30,5 m²/dia.

O valor encontrado pelo método semi-analítico para o coeficiente de armazenamento, $1,48 \cdot 10^{-10}$, não é muito diferente do que foi encontrado por modelação inversa ($5,36 \cdot 10^{-9}$).

Tabela 11.3.17 – Caudais observados e simulados com os modelos *SDM_T0* e *SDM_T0R*.

Tempo (minutos)	Q (m3/h) Observado	Q (m3/h) SDM_T0	Q (m3/h) SDM_T0R	Tempo (minutos)	Q (m3/h) Observado	Q (m3/h) SDM_T0	Q (m3/h) SDM_T0R
1	-9,68	-4,32	-9,72	70	-8,83	-3,24	-8,82
2	-9,33	-3,90	-9,30	80	-8,77	-3,24	-8,82
3	-9,21	-3,78	-9,18	90	-8,77	-3,24	-8,76
4	-9,19	-3,66	-9,12	100	-8,77	-3,24	-8,76
5	-9,15	-3,60	-9,18	150	-8,61	-3,24	-8,64
6	-9,15	-3,60	-9,12	200	-8,61	-3,24	-8,58
7	-9,10	-3,48	-9,12	250	-8,58	-3,18	-8,52
8	-9,13	-3,54	-9,06	350	-8,42	-3,18	-8,40
9	-9,09	-3,48	-9,12	500	-8,33	-3,18	-8,34
10	-9,09	-3,42	-9,06	750	-8,06	-3,24	-8,10
15	-9,01	-3,42	-9,06	940	-7,96	-3,18	-7,98
20	-9,00	-3,36	-9,00	1450	-7,78	-3,18	-7,74
30	-8,92	-3,30	-9,00	1800	-7,57	-3,12	-7,56
40	-8,89	-3,30	-8,88	2850	-7,21	-3,18	-7,20
50	-8,85	-3,24	-8,88	3330	-7,08	-3,18	-7,02
60	-8,82	-3,24	-8,88	4300	-6,73	-3,18	-6,78

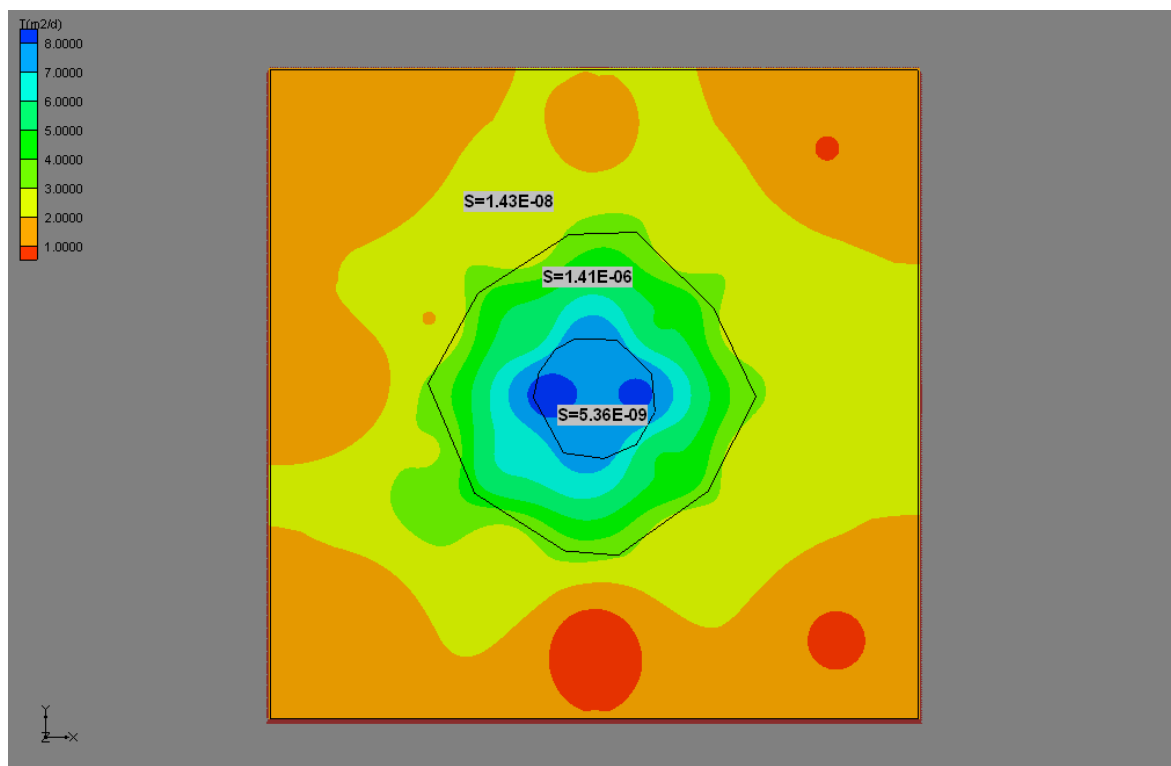


Figura 11.36 Transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S) no domínio de simulação calculada por modelação inversa em regime transitório com o modelo *SDM_T0R*

Como foi oportunamente referido (Costa, 1988), "... parece importante concluir que o coeficiente de armazenamento deste aquífero é, neste ponto, muito pequeno, denunciando as condições de confinamento e de baixa elasticidade do aquífero."

O aquífero Moura-Ficalho tem uma camada aquífera profunda caracterizada pelos valores baixos de condutividade hidráulica e de capacidade de armazenamento, neste sector do aquífero.

11.3.7 Ensaio em Póvoa de S. Miguel

Foi ensaiado um furo de captação (F10/502) construído na sequência de uma campanha de prospecção geofísica, com vista a reforçar o caudal captado para o abastecimento público desta povoação do concelho de Moura. Neste caso é captado um pequeno aquífero fissurado, relacionado com o sistema de falhas de orientação próxima de E-W, passando junto desta povoação, que se desenvolve em direcção à Amareleja.

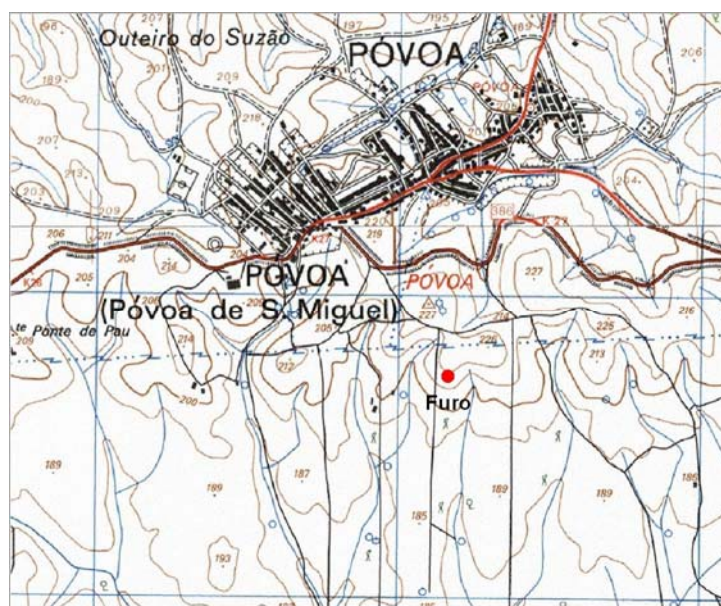


Figura 11.37 Local dos trabalhos (extracto das folhas 492 e 502 da Carta Militar de Portugal, na escala 1/25.000)

O ensaio teve início às 15 horas do dia 17 de Fevereiro de 2004, prolongando-se durante 48 horas e 50 minutos. A bombagem fez-se a caudal variável, uma vez que se pretendia aconselhar um caudal de exploração, sendo a média ponderada do caudal $7,37 \text{ m}^3/\text{h}$. As medições feitas durante a bombagem constam da Tabela 11.3.18.

A interpretação do ensaio de bombagem foi feita utilizando os métodos Jacob e Theis.

Como se pode constatar na Figura 11.38, foram considerados os dois caudais que prevaleceram em cada um dos troços e os valores obtidos, $3,9$ e $3,1 \text{ m}^2/\text{dia}$, o que em rigor não se poderia fazer mas os valores encontrados são assumidos apenas como uma ordem de grandeza.

Na Figura 11.39 apresenta-se o gráfico bilogarítmico elaborado para a interpretação deste ensaio pelo método de Theis, desprezando as medições finais. O valor encontrado foi cerca de $5 \text{ m}^2/\text{dia}$.

Tabela 11.3.18 - Níveis e rebaixamentos durante a bombagem na Póvoa de S. Miguel.

Hora	t (min.)	Nível (m)	Reb. (m)	Hora	t (min.)	Nível (m)	Reb. (m)
2/17/2004 (1)15:01	1,00	22,60	15,11	2/18/2004 (2)8:20	1040,00	70,00	62,51
15:03	3,17	33,30	25,81	8:30	1050,00	52,00	44,51
15:05	5,00	37,50	30,01	8:50	1070,00	48,95	41,46
15:12	12,83	43,70	36,21	10:00	1140,00	48,47	40,98
15:15	15,00	44,52	37,03	10:25	1165,00	48,39	40,90
15:20	20,00	45,93	38,44	10:30	1170,00	48,54	41,05
15:23	23,00	46,73	39,24	14:13	1393,00	48,75	41,26
15:25	25,00	47,15	39,66	15:40	1480,00	48,87	41,38
15:30	30,00	47,57	40,08	16:40	1540,00	48,99	41,50
15:50	50,00	50,00	42,51	17:30	1590,00	49,07	41,58
16:25	85,00	52,00	44,51	21:00	1800,00	49,21	41,72
16:55	115,00	52,52	45,03	23:30	1950,00	49,51	42,02
18:20	200,00	55,70	48,21	2/19/2004 8:45	2505,00	50,49	43,00
21:35	395,00	58,57	51,08	14:20	2840,00	51,1	43,61
23:40	520,00	60,43	52,94	15:50	2930,00	51,19	43,70

(1) – Caudal 9,9 m³/h.

(2) – Caudal passou para 6,4 m³/h.

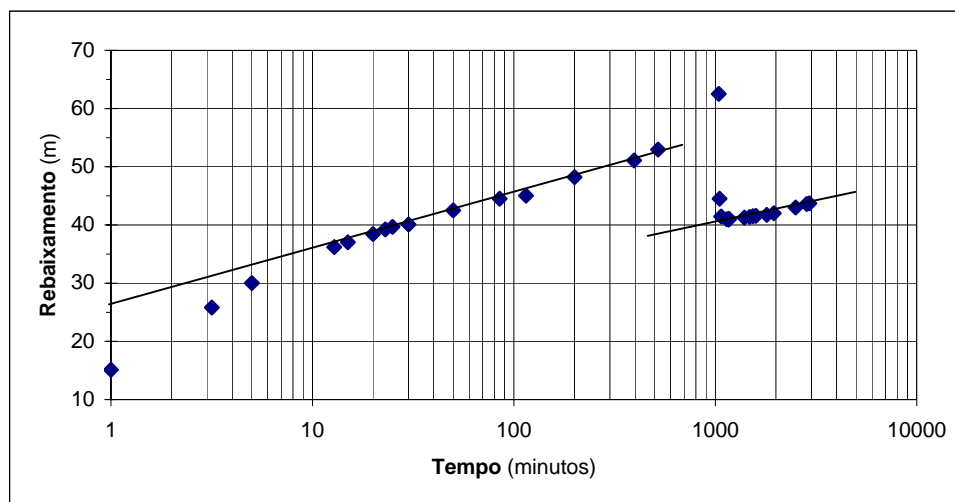


Figura 11.38 Interpretação pelo método de Jacob

Na recuperação de níveis, cujas medições constam da Tabela 11.3.19, foi considerada a média ponderada do caudal de bombagem. Na Figura 11.40 representa-se o gráfico interpretativo, onde se podem identificar dois troços rectilíneos. A orientação do segundo troço de recuperação afasta-se significativamente da origem do gráfico o que poderá indiciar algumas limitações na quantidade de recurso disponível.

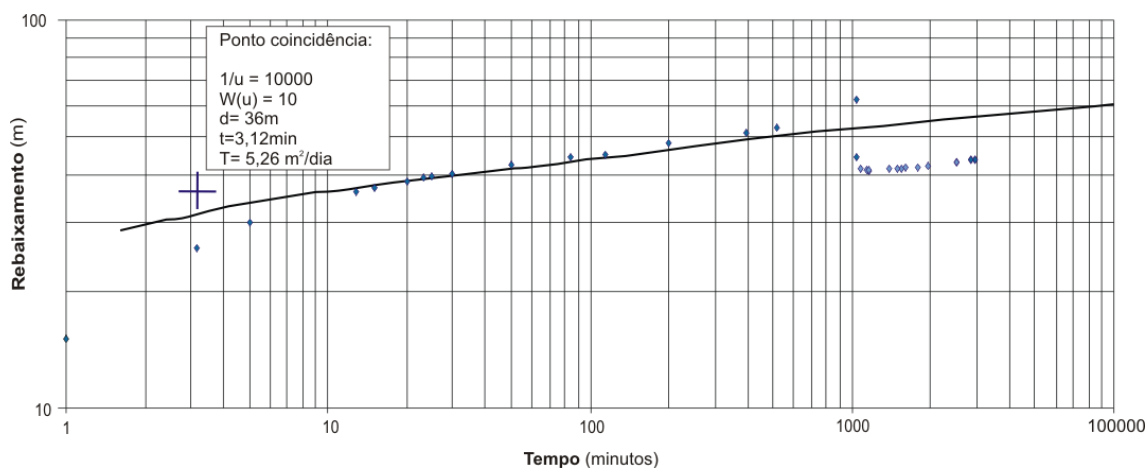


Figura 11.39 Interpretação pelo método de Theis.

Tabela 11.3.19 - Níveis e rebaixamentos durante a recuperação de níveis na Póvoa de S. Miguel.

t (min.)	Nível (m)	Reb. (m)
1,00	44,64	37,15
2,00	40,61	33,12
3,00	37,73	30,24
4,00	35,80	28,31
5,00	34,47	26,98
6,00	33,08	25,59
7,00	32,30	24,81
8,00	31,68	24,19
9,00	31,19	23,70
10,00	30,79	23,30
15,00	29,71	22,22
20,00	29,05	21,56
25,00	28,61	21,12
30,00	28,26	20,77
35,00	27,97	20,48
40,00	27,74	20,25

A transmissividade calculada a partir do último troço rectilíneo de recuperação é de 5,9 m²/dia.

Atendendo à previsível limitação espacial deste pequeno aquífero fissurado, foi recomendado que o caudal de exploração não ultrapassasse os 6 m³/h.

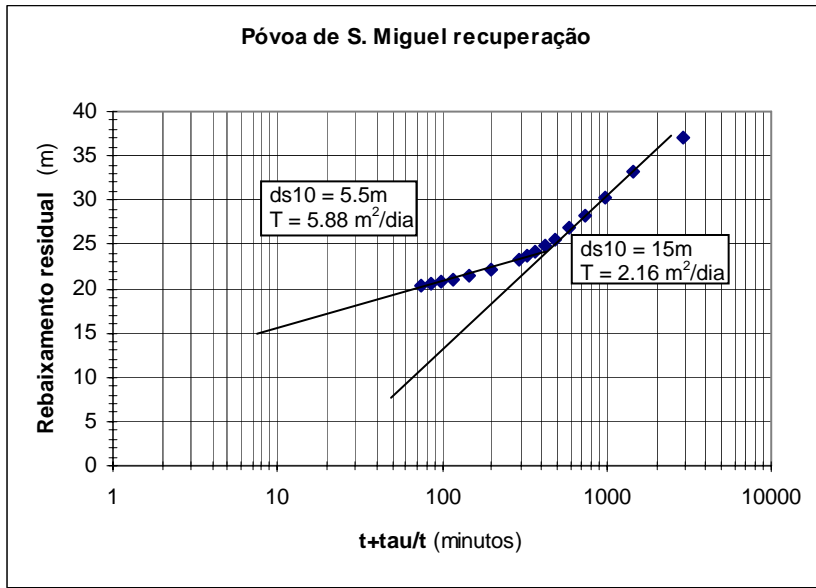


Figura 11.40 - Recuperação de níveis na captação

11.3.8 Ensaios na Horta da Cristina

A Horta da Cristina é uma exploração agro-pecuária em que existem furos que captam o aquífero Moura-Brenhas (Figura 11.41).

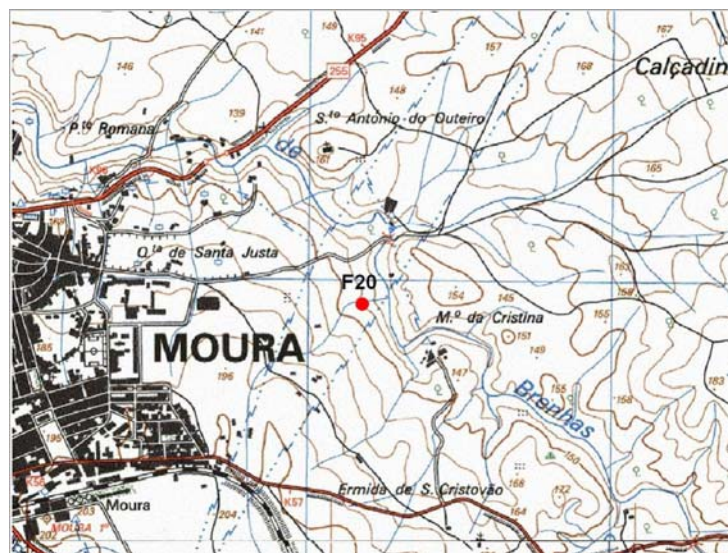


Figura 11.41 Extracto da folha 501 da Carta Militar de Portugal na escala 1/25.000, com indicação do local dos ensaios

Em Julho de 1984 foi realizado um ensaio de bombagem e recuperação que permitiu calcular a transmissividade e o coeficiente de armazenamento, além de se ter identificado um efeito de barreira negativa, provavelmente originado num limite do aquífero.

O caudal de bombagem foi 44 m³/h, num furo equipado com bomba eléctrica submersível (F20/501), sendo o acompanhamento de níveis sido possível apenas num outro furo próximo (a 3,55 m de distância), que não estava equipado. Trata-se, segundo informação do proprietário, de uma primeira sondagem feita, que não chegou a ser transformada em captação por dificuldades construtivas, mas que serve como ponto de observação de níveis.

A bombagem teve início no dia 19/07/1984, às 8:15, com o nível da água no piezómetro a 6,93 m de profundidade. As medições feitas durante a bombagem constam da Tabela 11.3.20.

Com base nas medições feitas, no sentido de interpretar o ensaio pelo método de Jacob, foi elaborado o gráfico da Figura 11.42.

Como se pode observar existem dois segmentos rectos definidos. O facto de o segundo segmento recto ter um declive de 0,95 m, enquanto o primeiro troço recto tem apenas 0,27 m, poderá indiciar algumas limitações espaciais do aquífero, o que parece corresponder à realidade geológica da zona (várias barreiras negativas ou estas com formas não rectilíneas).

Tabela 11.3.20 - Níveis e rebaixamentos durante a bombagem em F20/501 (Horta da Cristina).

t (min.)	Nível (m)	Reb. (m)	t (min.)	Nível (m)	Reb. (m)
1	7,28	0,35	30	7,60	0,67
2	7,31	0,38	60	7,76	0,83
3	7,34	0,41	66	7,78	0,85
4	7,36	0,43	70	7,80	0,87
5	7,38	0,45	82	7,80	0,87
6	7,40	0,47	95	7,89	0,96
7	7,41	0,48	110	7,93	1,00
8	7,42	0,49	190	8,16	1,23
9	7,43	0,50	240	8,26	1,33
10	7,45	0,52	335	8,40	1,47
15	7,49	0,56	340	8,41	1,48
20	7,53	0,60			

Pode assim calcular-se uma transmissividade de 726 m²/dia e um coeficiente de armazenamento de 0,01, com base no primeiro troço recto, e uma “transmissividade de comportamento”, segundo terminologia proposta por Iglesias (1984), com base no troço recto influenciado, de 227 m²/dia.

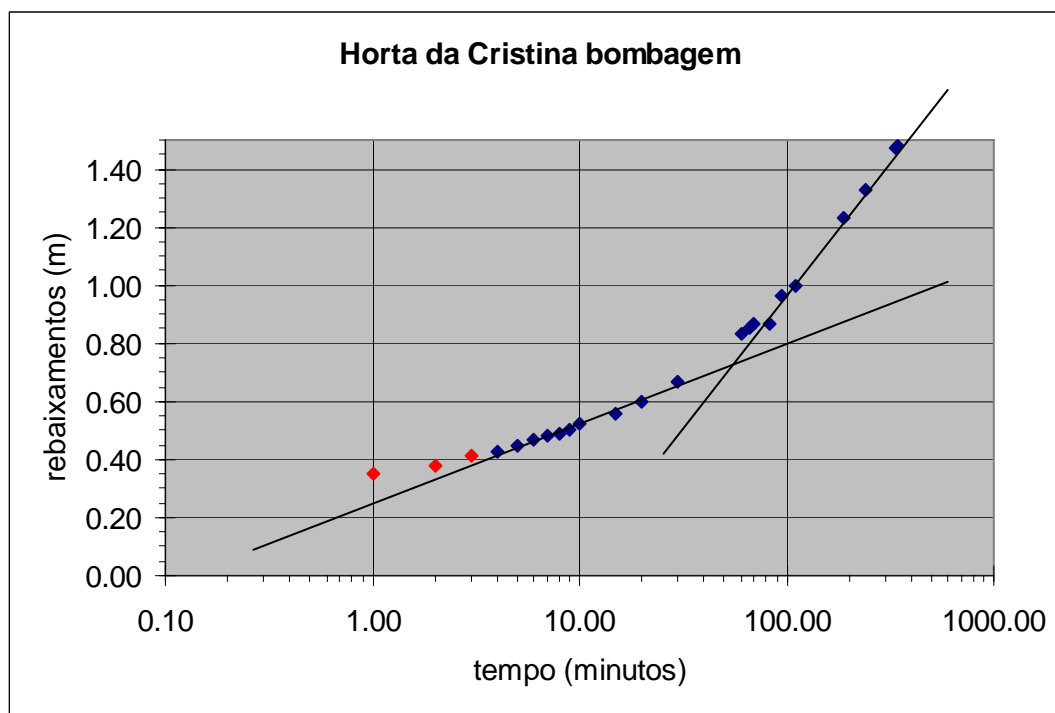


Figura 11.42 Evolução do rebaixamento no piezómetro durante a bombagem

As determinações feitas na recuperação constam da Tabela 11.3.21 e do gráfico da Figura 11.43.

Tabela 11.3.21 - Recuperação de níveis em F20/501 (Horta da Cristina).

t (min.)	(t+τ)/t	Nível (m)	Reb. (m)	t (min.)	(t+τ)/t	Nível (m)	Reb. (m)
0,50	681,00	8,09	1,16	10,00	35,00	7,88	0,95
1,00	341,00	8,06	1,13	11,00	31,91	7,87	0,94
1,50	227,67	8,04	1,11	15,00	23,67	7,82	0,89
2,00	171,00	8,02	1,09	20,00	18,00	7,78	0,85
3,00	114,33	8,00	1,07	25,00	14,60	7,74	0,81
4,00	86,00	7,97	1,04	30,00	12,33	7,71	0,78
5,00	69,00	7,95	1,02	40,00	9,50	7,65	0,72
6,00	57,67	7,94	1,01	60,00	6,67	7,56	0,63
7,00	49,57	7,92	0,99	120,00	3,83	7,40	0,47
8,00	43,50	7,91	0,98	180,00	2,89	7,30	0,37
9,00	38,78	7,89	0,96				

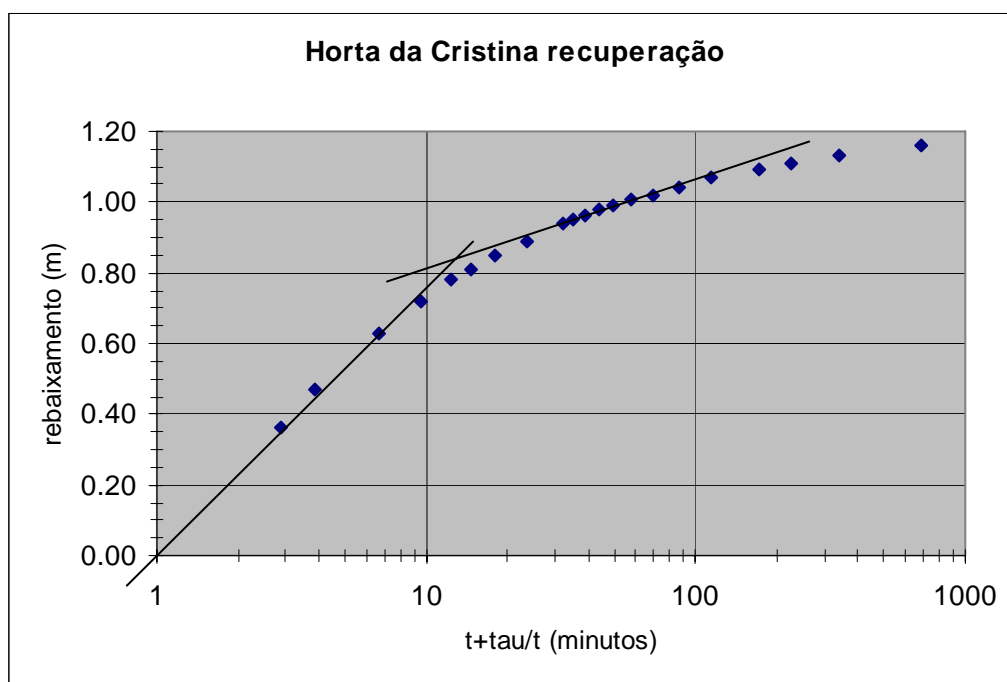


Figura 11.43 Evolução do rebaixamento residual no piezómetro, durante a recuperação

Também durante a recuperação se definem troços com diferentes declives, No gráfico representa-se um segmento de recta com o declive calculado na bombagem (0,27 m) e, o último troço recto, que se dirige para a origem, tem um declive de 0,75 m, a que corresponderá uma transmissividade de 258 m²/dia.

A conclusão a extrair é que o aquífero Moura-Brenhas é um aquífero livre, nesta zona, com um coeficiente de armazenamento da ordem de 0,01 e que existem limites do aquífero e heterogeneidades na transmissividade grandes ($227-726 \text{ m}^2/\text{dia}$) provavelmente relacionadas com os próprios limites do aquífero. Tanto quanto foi possível avaliar com o tempo de bombagem do ensaio, não se detectaram limitações no volume do recurso (a recuperação foi total).

11.4 Síntese de resultados

Em síntese, os resultados obtidos com os ensaios de aquífero são os que constam da Tabela 11.4.1 e, da observação desta tabela, pode concluir-se que os métodos analíticos de interpretação dos ensaios de aquífero utilizados constituem ferramentas muito úteis e que permitem uma primeira interpretação dos valores que se vão obtendo, possibilitando uma investigação atempada de características geológicas e de particularidades hidráulicas que, com alguma frequência são fundamentais para a caracterização hidráulica do aquífero em investigação, naquela zona.

Existem limitações neste métodos interpretativos que poderão, posteriormente e num trabalho mais pormenorizado, ser explicados com recurso a modelos de escoamento subterrâneos desenvolvidos a uma escala local.

As técnicas de modelação do escoamento subterrâneo constituem ferramentas poderosas que podem contribuir para a explicação de processos naturais ou induzidos pelo Homem. Contudo estes modelos são sempre uma simplificação da realidade e esta, em particular em meios cársicos e fracturados, reserva quase sempre determinadas características que dificilmente conseguimos conhecer.

Tabela 11.4.1 - Síntese dos resultados obtidos com os ensaios da região.

Aquífero	Local ensaio	Método de interpretação	Tipo de ensaio	Níveis controlados	Tm ² /dia	S
Moura-Brenhas	Horta Cristina	Jacob	bombagem recuperação	piezometro	227 a 726 258	0,01
Calcários de Moura	Casal das Boeiras	Jacob	bombagem	furo bombagem piezometro	20,3 a 41 18,6 a 37,4	8,51E-05
		Pumptest - Jacob Pumptest - Theis		piezometro	21,9 23,6	1,77E-04 1,49E-04
Moura-Ficalho (1.ª Camada)	Poço da Mina	Jacob	bombagem	poço	1269	
	Gargalão	Jacob	bombagem recuperação bombagem recuperação	furo bombagem	223 a 707 430 a 1415	0,2
				piezómetro	1415 792 a 3302	
	Herdade das Cortes	Jacob	bombagem	furo bombagem - F2 furo bombagem - F3 furo bombagem - F4	962 290 822	
					Thiem	bombagem
Fonte da Telha	Thiem	bombagem		3514		
Moura-Ficalho (2.ª Camada)	Casal Santo André	Ferris	repuxante	sondagem	30,5	1,48E-10
		modflow			8	5,36E-09
Xistos Moura	Póvoa S. Miguel	Jacob	bombagem recuperação	furo bombagem	3,1 a 4 2,16 a 5,88	
		Theis	bombagem	furo bombagem	5	

Os aquíferos cársicos da região (Moura-Ficalho e Moura-Brenhas) apresentam transmissividade geralmente elevadas (da ordem das centenas ou mesmo milhares de metros quadrados por dia, nos níveis mais superficiais geralmente explorados através de furos de captação. O coeficiente de

armazenamento é da ordem de 1 a 20%, nas zonas em que este não se encontra confinado.

A transmissividade do aquífero Moura-Ficalho reduz-se em profundidade, supondo-se que se possa diferenciar um nível aquífero profundo, confinado e de características de condutividade horizontal baixas e, por não ter nenhuma descarga natural a estas cotas, estas águas têm tempos de residência muito elevados (da ordem de milhares de anos, como se referiu no capítulo 10).

ÍNDICE DO CAPÍTULO 11

11 modelos locais (analíticos e semi-analíticos)	83
11.1 Introdução	83
11.2 Técnicas de interpretação	84
11.2.1 Regime permanente - Método de Thiem.....	84
11.2.2 Regime transitório	85
11.2.3 Interpretação de situações particulares	89
11.3 Ensaios efectuados na região	99
11.3.1 Ensaios no poço da mina da Preguiça	100
11.3.2 Ensaios na Herdade das Cortes (Vale de Vargo)	104
11.3.3 Ensaios no Casal das Boieiras (Moura)	107
11.3.4 Ensaios no Gargalão.....	115
11.3.5 Ensaio em Fonte da Telha	124
11.3.6 Ensaio no Casal de Santo André (<i>SDM11</i>).....	126
11.3.7 Ensaios em Póvoa de S. Miguel	132
11.3.8 Ensaios na Horta da Cristina	136
11.4 Síntese de resultados	140

Índice de tabelas:

Tabela 11.3.1 – Níveis medidos e rebaixamentos calculados no Poço da Mina na bombagem.	101
Tabela 11.3.2 – Níveis medidos e rebaixamentos calculados no Poço da Mina na recuperação. ..	102
Tabela 11.3.3 – Níveis e rebaixamentos calculados em Herdade das Cortes, nas bombagens.	105
Tabela 11.3.4 – Distâncias e rebaixamentos dos furos de Herdade das Cortes.	105
Tabela 11.3.5 – Características dos locais de observação piezométrica (Casal das Boieiras).	108
Tabela 11.3.6 – Rebaixamentos em F24 durante a bombagem no próprio furo.	108
Tabela 11.3.7 - Rebaixamentos em H25 durante a bombagem de F24.	109
Tabela 11.3.8 – Declives, coeficientes de correlação e transmissividades calculadas pelo método de Jacob.	109
Tabela 11.3.9 – Resultados do programa <i>Pumptest</i>	111
Tabela 11.3.10 – Rebaixamento residual em recuperação.	111
Tabela 11.3.11 – Bombagem em F26.	112
Tabela 11.3.12 – Níveis em F1 durante a bombagem.	116
Tabela 11.3.13 – Recuperação de níveis em F1.	118
Tabela 11.3.14 – Níveis em H1 durante a bombagem em F1.	119
Tabela 11.3.15 – Recuperação de níveis em H1 (Gargalão).	120
Tabela 11.3.16 – Níveis estáticos e dinâmicos nos furos antigos de Fonte da Telha.	125
Tabela 11.3.17 – Caudais observados e simulados com os modelos <i>SDM_TO</i> e <i>SDM_TOR</i>	130
Tabela 11.3.18 - Níveis e rebaixamentos durante a bombagem na Póvoa de S. Miguel.	133
Tabela 11.3.19 - Níveis e rebaixamentos durante a recuperação de níveis na Póvoa de S. Miguel.	134
Tabela 11.3.20 - Níveis e rebaixamentos durante a bombagem em F20/501 (Horta da Cristina). ..	137
Tabela 11.3.21 - Recuperação de níveis em F20/501 (Horta da Cristina).	138
Tabela 11.4.1 - Síntese dos resultados obtidos com os ensaios da região.	140

Índice de figuras:

Figura 11.1 Bombagem no poço da mina da Preguiça, com identificação de vários efeitos que afectaram os níveis observados.....	91
Figura 11.2 Simulação da bombagem e recuperação sem qualquer barreira. Considerada uma transmissividade de $37 \text{ m}^2/\text{dia}$ e o coeficiente de armazenamento $8,51 \times 10^{-5}$	93
Figura 11.3 Linhas piezométricas simuladas no final da bombagem, considerando a transmissividade de $37 \text{ m}^2/\text{dia}$ e o coeficiente de armazenamento de $8,51 \times 10^{-5}$ (sem barreira).....	94
Figura 11.4 Simulação da bombagem e recuperação com a barreira situada a uma distância de 101,5 m do piezómetro.....	95
Figura 11.5 Linhas piezométricas no final da bombagem, considerando $T= 37 \text{ m}^2/\text{dia}$ e $S= 8,51 \times 10^{-5}$, influenciadas pela barreira.....	95
Figura 11.6 Rebaixamentos observados e simulados no piezómetro H25 durante a bombagem, do ensaio das Boieiras (Moura).....	96
Figura 11.7 Rebaixamentos observados e simulados no piezómetro H25 durante a recuperação, do ensaio das Boieiras (Moura).....	96
Figura 11.8 Locais onde se fizeram os ensaios de aquífero.....	99
Figura 11.9 Local dos trabalhos (extracto das folhas 513 e 524 da Carta Militar de Portugal, na escala 1/25.000).....	100
Figura 11.10 Interpretação da bombagem no poço da mina.....	102
Figura 11.11 Projecção semilogarítmica dos rebaixamentos residuais (em recuperação).....	103
Figura 11.12 Local dos trabalhos (extracto da folha 524 da Carta Militar de Portugal, na escala 1/25.000).....	104
Figura 11.13 Gráfico semi-logarítmico e interpretação dos ensaios de bombagem nos três furos da Herdade das Cortes.....	106
Figura 11.14 Local dos trabalhos (extracto das folhas 501 e 512 da Carta Militar de Portugal, na escala 1/25.000).....	107
Figura 11.15 Rebaixamentos na própria captação durante a bombagem.....	110
Figura 11.16 Rebaixamentos no piezómetro H25, durante a bombagem em F24.....	110
Figura 11.17 Níveis na captação F24, em recuperação.....	111
Figura 11.18 Níveis no piezómetro H25, em recuperação.....	112
Figura 11.19 Recuperação em H26, após bombagem a caudal variável.....	113
Figura 11.20 Perfil hidrogeológico interpretativo das condições existentes, na ausência de bombagens (adaptado de Costa, 1992).....	114
Figura 11.21 Localização das captações de Gargalão num extracto da carta militar n.º 524.....	115

Figura 11.22 Interpretação da evolução de níveis, na bombagem, em F1.....	117
Figura 11.23 Interpretação da evolução de níveis, na recuperação, em F1	118
Figura 11.24 Interpretação da evolução de níveis na bombagem de F1, em H1.	119
Figura 11.25 Interpretação da evolução de níveis na recuperação, em H1	120
Figura 11.26 Simulação do escoamento e condições de fronteira no final da bombagem em F1...	121
Figura 11.27 Simulação do escoamento da Ribeira de S. Pedro durante os ensaios de bombagem e recuperação	122
Figura 11.28 - Evolução de níveis em F1, com indicação das medições a tracejado.....	123
Figura 11.29 - Evolução de níveis em H1, com indicação das medições a tracejado	123
Figura 11.30 Localização dos furos de abastecimento da Fonte da Telha (extracto da folha 512 da Carta Militar 1/25.000, ampliada para a escala 1/10.000	124
Figura 11.31 Interpretação de ensaio em regime estacionário pelo método de Thiem	125
Figura 11.32 Local dos trabalhos (extracto da folha 512 da Carta Militar de Portugal, na escala 1/25.000)	126
Figura 11.33 Linhas piezométricas do modelo SDM_0, em regime permanente	127
Figura 11.34 Transmissividade no domínio de simulação calculada por modelação inversa em regime permanente com o modelo SDM_OR	128
Figura 11.35 Variação de caudal observada e simulada na sondagem <i>SDM11</i> , com base nos modelos <i>SDM_T0</i> e <i>SDM_T0R</i>	129
Figura 11.36 Transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S) no domínio de simulação calculada por modelação inversa em regime transitório com o modelo <i>SDM_T0R</i>	130
Figura 11.37 Local dos trabalhos (extracto das folhas 492 e 502 da Carta Militar de Portugal, na escala 1/25.000).....	132
Figura 11.38 Interpretação pelo método de Jacob	133
Figura 11.39 Interpretação pelo método de Theis.....	134
Figura 11.40 - Recuperação de níveis na captação	135
Figura 11.41 Extracto da folha 501 da Carta Militar de Portugal na escala 1/25.000, com indicação do local dos ensaios.....	136
Figura 11.42 Evolução do rebaixamento no piezómetro durante a bombagem	137
Figura 11.43 Evolução do rebaixamento residual no piezómetro, durante a recuperação	138

12 MODELAÇÃO NUMÉRICA DE FLUXO

O principal objectivo da presente tese consiste no desenvolvimento de um modelo matemático do escoamento subterrâneo, à escala do principal aquífero da região, susceptível de ser utilizado como ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos.

No presente capítulo faz-se uma breve descrição do *software* seleccionado para o desenvolvimento do modelo regional, incidindo esta, apenas nos módulos da aplicação que foram utilizados na presente situação de estudo.

12.1 Modelação de aquíferos cársicos

Os aquíferos cársicos típicos podem ser interpretados como um sistema de dupla condutividade hidráulica com duas redes ligadas - uma caracterizada pela elevada velocidade de fluxo, através de condutas cársicas bem desenvolvidas, e outra caracterizada pelo fluxo hídrico lento, através de uma densa rede de pequenas fracturas. A capacidade de armazenamento do aquífero está essencialmente relacionada com esta segunda rede.

Tal como foi amplamente discutido por Monteiro (2001), a importância relativa de cada uma das redes referidas e a sua conectividade dependem, não só do aquífero em estudo como da escala e objectivo da investigação. A avaliação quantitativa dessa importância relativa nem sempre é fácil, nem existe uma metodologia universal a aplicar para esse fim (Monteiro, 2001).

No presente caso de estudo, a observação do comportamento de nascentes em período de estiagem e a análise da evolução geral dos níveis piezométricos, parecem indicar uma predominância do fluxo difuso (rede de pequenas aberturas) sobre o fluxo concentrado (rede de condutas cársicas), na maior parte da extensão do aquífero Moura-Ficalho e à escala deste.

Atendendo ao exposto e seguindo as conclusões a que chegaram vários autores sobre a possibilidade de utilização de modelos de meio poroso equivalente em aquíferos cársicos (Larocque, *et al.*, 1999, Sepulveda, 2002, Scanlon, *et al.*, 2003, Kuniansky, 2005, Putnam e Long, 2005), foi seleccionado o *software Modflow* para a implementação do modelo regional de fluxo do Aquífero Moura-Ficalho.

O *Modflow* é um programa modular escrito originalmente em linguagem *Fortran 66* (publicado a 28/12/1983 no U.S. Geological Survey Open-File Report 83-875), em que a equação de fluxo é resolvida pela aproximação da diferenças finitas, considerando o domínio de escoamento subdividido em células cujas propriedades médias se assumem uniformes, conforme proposto originalmente por Trescott (1975), Trescott e Larson (1976) e Trescott *et al* (1976), nos primeiros modelos bidimensionais e tridimensionais de diferenças finitas.

Por se tratar de um programa estruturado, modular e de domínio público, desde então foram acrescentados módulos para simulação de vários processos como a recarga, a evapotranspiração,

as relações hidráulicas com rios ou drenos, as extracções de água em furos, etc..

O programa, modificado para *Fortran 77*, foi amplamente documentado por McDonald e Harbaugh (1988). Esta versão do programa é frequentemente designada por *Modflow-88*. Uma terceira versão, designada por *Modflow-96*, foi documentada com manuais para o utilizador e para o programador (Harbaugh e McDonald, 1996a e 1996b).

Os Serviços Geológicos dos Estados Unidos promoveram o desenvolvimento de duas importantes extensões ao *Modflow-96*, que foram designadas *MODFLOWP* (Hill, 1992) e *MOC3D* (Konikow *et al*, 1996). No primeiro caso trata-se de um software capaz de partir de uma solução de simulação do *Modflow* e calcular um conjunto de valores de parâmetros pré-seleccionados que minimizam o erro entre os valores observados e simulados (processo habitualmente designado por modelação inversa), enquanto no segundo caso, trata-se de software para resolver a equação transporte em solução, avaliando a evolução da concentração de determinado constituinte químico ao longo do tempo, em função do gradiente hidráulico (calculado a partir do *Modflow*), resolvendo a equação de transporte pelo método das características e diversos outros processos pelo método de diferenças finitas.

Na versão actual (*Modflow-2000*) são incluídas diversas ferramentas estatísticas ligadas à análise de sensibilidades e à estimação de parâmetros, que facilitam todo o processo de calibração.

Actualmente existem diversas interfaces para esta aplicação em ambiente Windows que, ao mesmo tempo que a transformam numa aplicação interactiva amigável, facilitam o processo de calibração; no projecto ERHSA foi usada a aplicação *GMS (Groundwater Modeling System)*. Por se ter revelado uma boa interface, este *package* foi utilizado no âmbito desta tese e do projecto Metodologias para a definição do Parque Natural Hidrogeológico de Moura (HYDROPARK).

No âmbito da presente tese, apenas foram utilizados o programa *Modflow*, como programa de simulação do escoamento e vários programas de modelação inversa, em particular o *PEST*, no que respeita à calibração do modelo.

12.2 Formulação em diferenças finitas utilizando o software *Modflow*

A equação diferencial parcial utilizada no *Modflow* é representada da seguinte forma:

$$\text{Equação 12.1} \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

em que:

K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} - condutividade hidráulica segundo os eixos coordenados x , y e z , que se assumem paralelos aos eixos principais da condutividade hidráulica (L/T);

h - potencial hidráulico (L);

W - fluxo volumétrico por unidade de volume, representando entradas e/ou saídas do sistema, em que $W > 0.0$ representa qualquer entrada de água no sistema (por exemplo furos de injeção, rios influentes) e $W < 0.0$ representa qualquer saída de água do sistema (por exemplo furos de captação, nascentes, rios efluentes, etc.) (T^{-1});

S_S - armazenamento específico (L^{-1});

t - tempo (T^{-1}).

Desde que as direcções dos eixos de coordenadas correspondam aos eixos principais da condutividade hidráulica, a Equação 12.1, combinada com condições iniciais e de fronteira, representa o escoamento subterrâneo transitório num espaço tridimensional heterogéneo e anisótropo.

O *Modflow* resolve a equação diferencial anterior utilizando o método das diferenças finitas, segundo o qual o domínio é dividido numa malha de células, tal como se representa na Figura 12.1.

Cada uma destas células contém um ponto designado por nó (*node*), no qual o potencial hidráulico é calculado. A equação de diferenças finitas aplicada neste cálculo em cada célula é a seguinte (McDonald e Harbaugh, 1988):

$$\begin{aligned}
 & CR_{i,j-\frac{1}{2},k} \cdot (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} \cdot (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\
 & + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} \cdot (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} \cdot (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\
 \text{Equação 12.2} \quad & + CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} \cdot (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} \cdot (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) \\
 & P_{i,j,k} \cdot h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} \cdot (DEL R_j \cdot DEL C_k \cdot THICK_{i,j,k}) \cdot \left(\frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}} \right)
 \end{aligned}$$

em que:

$h_{i,j,k}^m$ - potencial hidráulico na célula i,j,k no incremento de tempo m (L);

CV , CR e CC - condutâncias hidráulicas, segundo os três eixos, de uma célula ou entre uma célula e outra vizinha, de acordo com os respectivos índices (L^2/T);

$P_{i,j,k}$ - soma dos coeficientes de potencial dos termos de nascente e sumidouro (L^2/T);

$Q_{i,j,k}$ - representa a soma de constantes dos termos de entradas e saídas, correspondendo $Q_{i,j,k} < 0$ a água que sai do sistema e $Q_{i,j,k} > 0$ a água que entra no sistema (L^3/T);

$SS_{i,j,k}$ - armazenamento específico (L^{-1});

$DEL R_j$ - comprimento das células da coluna j em todas as linhas;

$DEL C_i$ - comprimento das células da linha i em todas as colunas;

$THICK_{i,j,k}$ - espessura vertical da célula i,j,k ;

t^m - tempo no incremento de tempo m (T).

Para designar as condutâncias entre nós é utilizada uma notação de índices com a expressão "1/2".

Assim, por exemplo, $CC_{i-1/2,j,k}$ designa a condutância entre os nós das células $i-1,j,k$ e i,j,k .

Ao nível do computador a equação anterior é substituída pela equivalente que se apresenta em seguida. Em cada célula do domínio de simulação e para cada incremento de tempo, é resolvida em relação ao potencial hidráulico a Equação 12.3.

Equação 12.3

$$CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} \cdot h_{i,j,k-1}^m + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} \cdot h_{i-1,j,k}^m + CR_{i,j-\frac{1}{2},k} \cdot h_{i,j-1,k}^m + \left(-CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} - CC_{i-\frac{1}{2},j,k} - CR_{i,j-\frac{1}{2},k} - CR_{i,j+\frac{1}{2},k} - CC_{i+\frac{1}{2},j,k} - CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} + HCOF_{i,j,k} \right) \cdot h_{i,j,k} + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} \cdot h_{i,j+1,k} + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} \cdot h_{i+1,j,k}^m + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} \cdot h_{i,j,k+1}^m = RHS_{i,j,k}$$

Nesta equação, são introduzidos alguns termos novos, que se passam a caracterizar:

- $CHCOF_{i,j,k}$ - contém $P_{i,j,k}$ e o negativo da parte do termo de armazenamento que inclui o potencial hidráulico no incremento de tempo m ;
- $RHS_{i,j,k}$ inclui $-Q$ e a parte do termo de armazenamento que é multiplicada pelo potencial hidráulico no incremento de tempo $m-1$.

A resolução da equação de fluxo faz-se em cada célula activa e em cada incremento de tempo. A definição das células activas e inactivas faz-se através de uma variável tridimensional designada *IBOUND* (variável de fronteira), que assume valores para cada célula que indicam as seguintes condições:

- $IBOUND_{i,j,k} = 0$, célula inactiva;
- Se $IBOUND_{i,j,k} > 0$, célula activa (célula de potencial variável);
- Se $IBOUND_{i,j,k} < 0$, célula de potencial constante.

Na versão original do *Modflow* a resolução da equação de fluxo era feita num pacote de fluxo interno (internal flow package) chamado *BCF* (Block-Centered Flow). Posteriormente surgiu a possibilidade de optar entre este e o *GDF* (Generalized Finite-Difference) (Harbaugh, 1992),

surgindo na versão *Modflow* 2000 um novo pacote de fluxo interno, chamado *LPF* (Layer-Property Flow) (Harbaugh *et al*, 2000). Trata-se de abordagens diferentes e alternativas na resolução da equação de fluxo. A principal diferença que foi introduzida com a abordagem *LPF*, que foi a utilizada no modelo implementado, consiste no facto de se resolver a equação de fluxo com base nos valores de condutância hidráulica.

12.2.1 Condutância hidráulica

A condutância hidráulica, abreviadamente designada apenas por condutância, foi definida por McDonald e Harbaugh (1988) como uma combinação de diferentes parâmetros utilizados na lei de Darcy. Esta define o fluxo unidimensional num prisma poroso como:

Equação 12.4

$$Q = \frac{-K \cdot A \cdot (h_2 - h_1)}{L}$$

em que:

Q - fluxo volumétrico (L^3T^{-1});

K - condutividade hidráulica na direcção do fluxo (LT^{-1});

A - área da secção perpendicular à direcção de fluxo (L^2);

h_2-h_1 - diferença de potencial hidráulico ao longo do prisma no sentido do fluxo (L);

L - comprimento do prisma segundo a direcção do fluxo (L).

A condutância (C) é definida como:

Equação 12.5

$$C = \frac{K \cdot A}{L}$$

Utilizando a condutância, a lei de Darcy pode ser escrita como:

Equação 12.6

$$Q = C \cdot (h_1 - h_2)$$

O conceito de condutância equivalente, correspondente a um conjunto alinhado de células organizado em série foi apresentado em Harbaugh *et al* (2000). Se um prisma de material poroso for constituído por n sub-prismas em série (organizados sequencialmente na direcção de fluxo) e a condutância de cada sub-prisma for conhecida, a condutância equivalente do prisma maior pode ser calculada (ver Figura 12.1).

Equação 12.7

$$\frac{1}{C} = \sum_n \frac{1}{C_n}$$

No caso de se tratar apenas de dois sub-prismas, ter-se-á:

Equação 12.8

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

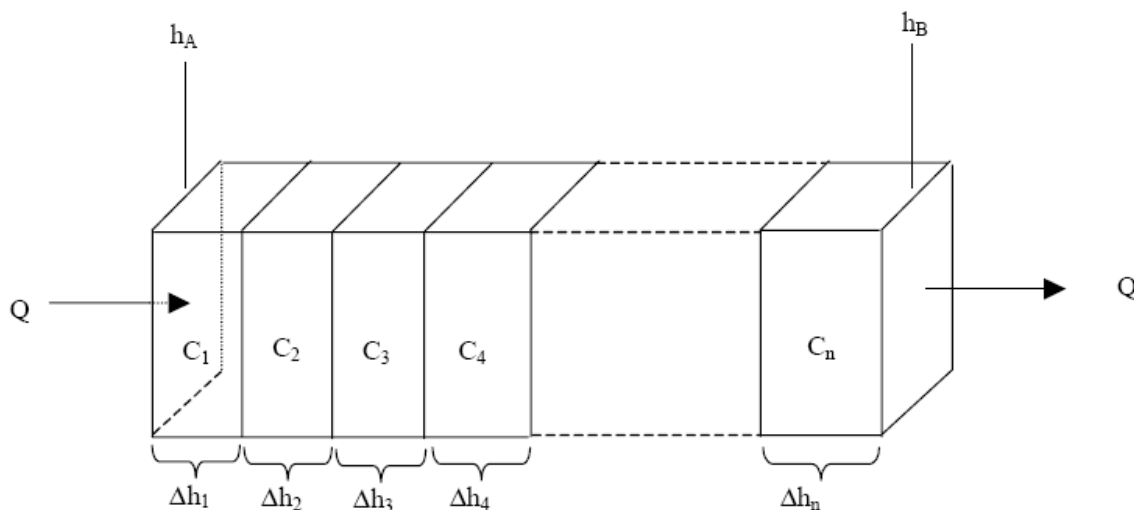


Figura 12.1 Cálculo da condutância através de uma série de prismas (Harbaugh *et al*, 2000).

Condutância horizontal

O *Modflow* utiliza as condutâncias equivalentes entre nós de células adjacentes segundo linhas e segundo colunas, em vez das condutâncias das células individualmente, na resolução das equações de diferenças finitas.

O *package LPF* pode calcular as condutâncias equivalentes (*interblock transmissivity*) por três métodos diferentes, a que correspondem também diferentes pressupostos (método da "média harmónica", da "média logarítmica" e da "média aritmética da espessura saturada e média logarítmica da condutividade hidráulica"). No presente trabalho foi sempre utilizado o método da média harmónica no cálculo da transmissividade entre blocos. Como pressupostos para este método admite-se que a transmissividade (condutividade hidráulica x espessura) é constante em cada célula, podendo contudo haver variações discretas de transmissividade entre quaisquer duas células adjacentes. Atendendo ao facto de os nós serem centrados nas células no *package LPF*, as condutâncias entre nós adjacentes correspondem à condutância equivalente das duas meias células adjacentes em série. Assim, considerando que a condutância também pode ser definida a partir da transmissividade e substituindo na Equação 12.8, tem-se:

$$\text{Equação 12.9} \quad CR_{i,j+\frac{1}{2},k} = 2 \cdot DELC_i \cdot \frac{TR_{i,j,k} \cdot TR_{i,j+1,k}}{TR_{i,j,k} \cdot DELR_{j+1} + TR_{i,j+1,k} \cdot DELR_j}$$

em que:

$TR_{i,j,k}$ - transmissividade na célula i,j,k , segundo a direcção das linhas da malha de células (L^2T^{-1});

$DELR_j$ - largura da coluna j (L);

$DELC_i$ - largura da linha i (L).

Em relação à condutância entre nós segundo as colunas tem-se a equação equivalente seguinte:

$$\text{Equação 12.10} \quad CC_{i+\frac{1}{2},j,k} = 2 \cdot DELC_i \cdot \frac{TC_{i,j,k} \cdot TC_{i+1,j,k}}{TC_{i,j,k} \cdot DELC_{i+1} + TC_{i+1,j,k} \cdot DELC_i}$$

em que:

$TC_{i,j,k}$ - transmissividade na célula i,j,k , segundo a direcção das colunas da malha de células (L^2T^{-1});

A transmissividade é calculada em cada célula a partir da espessura saturada e da condutividade hidráulica que, no caso de se considerar a anisotropia horizontal ($HANI$), pode ser calculada pelas equações seguintes:

$$\text{Equação 12.11} \quad TR_{i,j,k} = THICK_{i,j,k} \cdot HK_{i,j,k}$$

$$\text{Equação 12.12} \quad TC_{i,j,k} = THICK_{i,j,k} \cdot HK_{i,j,k} \cdot HANI_{i,j,k}$$

em que:

$HK_{i,j,k}$ - condutividade hidráulica da célula i,j,k na direcção das linhas (LT^{-1});

$HANI_{i,j,k}$ - razão entre a condutividade hidráulica na direcção das colunas e condutividade hidráulica na direcção das linhas (sem dimensão);

$THICK_{i,j,k}$ - espessura saturada da célula i,j,k (L).

Os valores de $HK_{i,j,k}$ e $HANI_{i,j,k}$ são especificados nos dados de entrada. Os valores de $THICK_{i,j,k}$ são calculados a partir da elevação da célula do ficheiro de discretização. O cálculo da espessura depende do tipo de camada que é especificado nos dados de entrada. No caso da abordagem *LPF*, contrariamente ao que sucede na abordagem *BCF*, apenas existem dois tipos de camadas,

confinadas e convertíveis ($LAYTYP= 0$ e $LAYTYP \neq 0$, respectivamente). Assim, no caso da camada ser confinada a espessura é apenas a diferença entre a cota do tecto e da base do aquífero naquela célula. Estes valores são calculados a partir do ficheiro de discretização.

No caso da camada não ser de tipo 0, isso quer dizer que a célula se comportará como livre ou confinada conforme a relação entre o potencial hidráulico e a cota do tecto da camada. Assim, se a camada for do tipo convertível, a espessura saturada ($THICK_{i,j,k}$) é calculada a partir do potencial hidráulico ($HNEW_{i,j,k}$) de acordo com as equações seguintes:

Equação 12.13 Se $HNEW_{i,j,k} \geq TOP_{i,j,k}$ então $THICK_{i,j,k} = (TOP_{i,j,k} - BOT_{i,j,k})$;

Equação 12.14 Se $TOP_{i,j,k} > HNEW_{i,j,k} > BOT_{i,j,k}$ então $THICK_{i,j,k} = (HNEW_{i,j,k} - BOT_{i,j,k})$;

Equação 12.15 Se $HNEW_{i,j,k} \leq BOT_{i,j,k}$ então $THICK_{i,j,k} = 0$.

No início de cada iteração com vista a resolver a equação de fluxo, os valores de transmissividade (TR e TC) são recalculados como o produto da condutividade hidráulica pela espessura saturada (Equação 12.11 e Equação 12.12).

Condutância vertical

A condutância vertical é calculada assumindo que os nós se situam no centro das células e que podem existir alterações discretas na condutividade hidráulica vertical no limite das camadas.

Pode demonstrar-se que a condutância vertical entre quaisquer dois nós adjacentes (ver Figura 12.2) entre as camadas k e $k+1$ ($CV_{i,j,k+1/2}$) é calculada pela equação:

Equação 12.16

$$CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} = \frac{DEL R_j \cdot DEL C_i}{\frac{1}{2} \cdot THICK_{i,j,k} \cdot \frac{1}{VK_{i,j,k}} + \frac{1}{2} \cdot THICK_{i,j,k+1} \cdot \frac{1}{VK_{i,j,k+1}}}$$

em que:

$VK_{i,j,k}$ - condutividade hidráulica vertical da célula i,j,k ;

$THICK_{i,j,k}$ - espessura saturada da célula i,j,k .

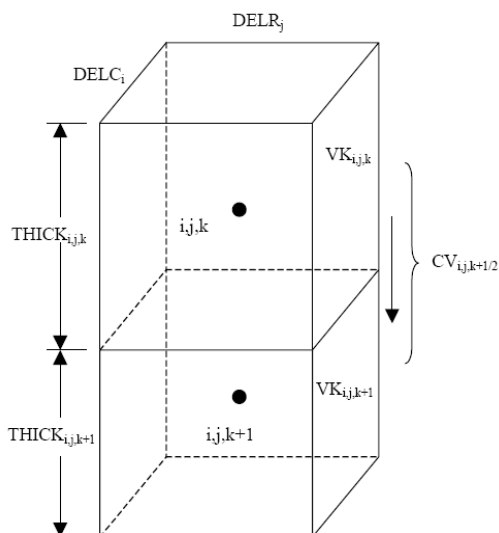


Figura 12.2 Cálculo da condutância vertical entre dois nós de células (Harbaugh *et al*, 2000).

Foi esta a equação utilizada na modelação do aquífero Moura-Ficalho, contudo existe uma outra abordagem para simular uma camada semi-confinante, que não foi utilizada na presente aplicação, mas merece aqui uma referência. Trata-se da abordagem "Quasi-3D" (McDonald e Harbaugh, 1988), que apenas terá aplicação no caso de haver uma camada de baixa permeabilidade, cujo único efeito significativo seja restringir os fluxos verticais entre duas camadas i,j,k e $i,j,k+1$. De facto, se a camada semi-confinante não intervier significativamente, quer na capacidade de armazenamento quer no fluxo horizontal, então pode simular-se este efeito sem considerar explicitamente uma camada intermédia de células, bastando introduzir mais duas variáveis que exprimem a espessura ($THICK_{CB}$) e a permeabilidade vertical (VK_{CB}) desta camada semi-confinante. Neste caso, a condutância vertical equivalente entre as duas camadas será dada por:

Equação 12.17

$$CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} = \frac{DEL R_j \cdot DEL C_i}{\frac{1}{2} \cdot \frac{THICK_{i,j,k}}{VK_{i,j,k}} + \frac{THICK_{CB}}{VK_{CB}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{THICK_{i,j,k+1}}{VK_{i,j,k+1}}}$$

A equação que representa o fluxo vertical entre as células i,j,k e $i,j,k+1$, num determinado incremento de tempo m , assume a forma:

Equação 12.18

$$q_{i,j,k+\frac{1}{2}} = CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} \cdot (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})$$

Assim, se o potencial hidráulico da célula inferior for maior, o valor resultante é positivo, isto é, entra água na célula superior, se o potencial hidráulico da célula inferior for menor do que o da célula superior, então o valor resultante é negativo, indicando que sai água da célula superior para a inferior. Contudo, existem situações em que a Equação 12.18 não pode ser aplicada que é o caso em que existem células do aquífero inferior confinado com rebaixamentos muito acentuados, de tal forma que o potencial hidráulico se torna inferior ao tecto do aquífero. Esta situação, em que o potencial hidráulico se situa, pontualmente e esporadicamente, abaixo do tecto da célula, é descrita na literatura anglo-saxónica com a expressão "dewatered cells". Nestas condições é necessário alterar a equação de fluxo (Equação 12.2), introduzindo uma correcção. Por razões de manutenção da simetria e da dominância diagonal da matriz de coeficientes das equações de diferenças finitas (Harbaugh *et al*, 2000), é necessário calcular este caudal de correcção da célula i,j,k , através de iterações sucessivas, segundo a equação seguinte:

Equação 12.19
$$q_c^n = CV_{i,j,k+1/2} \cdot (h_{i,j,k+1}^{n-1} - TOP_{i,j,k+1})$$

em que:

q_c^n - caudal de correcção a adicionar ao membro direito da Equação 12.2 da iteração n ;

$h_{i,j,k+1}^{n-1}$ - potencial hidráulico da célula $i,j,k+1$, na iteração anterior ($n-1$), substituindo o valor correspondente à iteração n .

Durante o processo iterativo, à medida que os valores convergem, a diferença entre $h_{i,j,k+1}^{n-1}$ e $h_{i,j,k+1}^n$ torna-se gradualmente menor, fazendo com que a Equação 12.19 seja mais precisa. O valor desta correcção é adicionado ao membro direito da Equação 12.3.

12.2.2 Armazenamento

Os termos que representam o armazenamento no *package LPF*, têm uma abordagem diferenciada conforme se trate de camadas do tipo confinado ($LAYTYP = 0$) ou do tipo convertível entre confinado e livre ($LAYTYP \neq 0$), segundo a posição relativa do potencial hidráulico e do tecto da camada aquífera.

Numa camada do tipo confinado a acumulação de água numa célula é dada pela Equação 12.20.

$$\text{Equação 12.20} \quad \frac{\Delta V}{\Delta t} = SS_{i,j,k} \cdot (DEL R_j \cdot DEL C_i \cdot THICK_{i,j,k}) \cdot \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}}$$

em que:

$SS_{i,j,k}$ - armazenamento específico (L^{-1});

$THICK_{i,j,k}$ - espessura saturada da célula i,j,k . (L);

$h_{i,j,k}^m$ - potencial hidráulico na célula i,j,k , no final do incremento de tempo m (L);

$h_{i,j,k}^{m-1}$ - potencial hidráulico da célula i,j,k , no final do incremento de tempo $m-1$ (L);

t^m - tempo no final do incremento de tempo m (T);

t^{m-1} - tempo no final do incremento de tempo $m-1$ (T).

O produto do armazenamento específico pelas dimensões da célula é o que se define como capacidade de armazenamento ou capacidade de armazenamento primária ("primary storage capacity" em Harbaugh *et al*, 2000), como se representa na Equação 12.21.

$$\text{Equação 12.21} \quad SC1_{i,j,k} = SS_{i,j,k} \cdot (DEL R_j \cdot DEL C_i \cdot THICK_{i,j,k})$$

Substituindo na Equação 12.20, obtém-se a Equação 12.22.

$$\text{Equação 12.22} \quad \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{SC1_{i,j,k} \cdot h_{i,j,k}^m}{t^m - t^{m-1}} - \frac{SC1_{i,j,k} \cdot h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}}$$

São os dois termos do membro direito da equação anterior que são incluídos nos termos $HCOF^{i,j,k}$ e $RHS_{i,j,k}$ da equação de fluxo (Equação 12.3).

Como foi anteriormente referido, a formulação do armazenamento depende do tipo de aquífero em presença. As equações antes apresentadas referem-se a células em condições de confinamento. Se o potencial hidráulico se situar abaixo do tecto da célula, em condições de aquífero livre, a formulação do armazenamento é diferente. Nestas condições, em relação ao armazenamento, define-se o chamado cedência específica ($SY_{i,j,k}$ (adimensional)) ("specific yield" em Harbaugh *et al*, 2000, pp. 36) e a capacidade de armazenamento secundária ($SC2_{i,j,k}$), conforme consta da Equação 12.23 e Equação 12.24.

$$\text{Equação 12.23} \quad \frac{\Delta V}{\Delta t} = SY_{i,j,k} \cdot (DELR_j \cdot DELC_i \cdot THICK_{i,j,k}) \cdot \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}}$$

$$\text{Equação 12.24} \quad \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{SC2_{i,j,k} \cdot h_{i,j,k}^m}{t^m - t^{m-1}} - \frac{SC2_{i,j,k} \cdot h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}}$$

Numa camada de tipo convertível, qualquer célula, em qualquer incremento de tempo, pode encontrar-se em quatro condições diferentes no que respeita ao armazenamento:

- A célula é confinada durante todo o incremento de tempo;
- A célula é livre durante todo o incremento de tempo;
- A célula passa de confinada a livre durante o incremento de tempo;
- A célula passa de livre a confinada durante o incremento de tempo.

Para lidar com esta possibilidade de alteração de condições durante o processo iterativo, para uma dada célula i,j,k , num dado incremento de tempo m , é necessário definir mais duas variáveis de capacidade de armazenamento: SCA e SCB . Enquanto SCA representa a capacidade de armazenamento efectiva no início do incremento de tempo (que transitou do incremento de tempo anterior), SCB é a capacidade de armazenamento efectiva durante as iterações do incremento de tempo m , cujo valor poderá ser alterado durante o processo iterativo de cada incremento de tempo. Assim, segundo Harbaugh *et al* (2000), a Equação 12.25 representa, em quaisquer circunstâncias, a variação de armazenamento de uma célula em cada incremento de tempo.

$$\text{Equação 12.25} \quad \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{SCB \cdot (h_{i,j,k}^m - TOP_{i,j,k}) + SCA \cdot (TOP_{i,j,k} - h_{i,j,k}^{m-1})}{t^m - t^{m-1}}$$

em que $TOP_{i,j,k}$ representa a cota do tecto da célula i,j,k .

12.3 Calibração e modelação inversa

A calibração de um modelo consiste em alterar os valores introduzidos num conjunto de parâmetros do modelo numérico de escoamento para que este produza valores simulados o mais próximo possível dos valores observados. Trata-se, por isso, de minimizar os erros de simulação. Esta operação pode ser feita manualmente, por tentativas, ou pode ser feita com recurso a programas específicos que minimizam esses erros. Na realidade é sempre necessário fazer alguma calibração manual para que se tenha uma solução aproximada, podendo então utilizar-se os chamados

programas de “calibração automática”. No *GMS* existem três programas disponíveis:

- *ModflowP* (Hill, 1992)
- *UCODE* (Poeter e Hill, 1998)
- *PEST* (Doherty, 2002).

Qualquer destas aplicações tem que partir de valores paramétricos iniciais, que têm que ser balizados de modo a definir os respectivos domínios de variação, e o programa vai executar sucessivas iterações até encontrar um conjunto de valores paramétricos que minimizem o erro. Geralmente podem existir vários mínimos relativos, o que justifica a importância de limitar criteriosamente os domínios de variação de cada parâmetro a estimar, de modo a encontrar soluções, não só matematicamente correctas, como fisicamente realistas.

Normalmente existe uma limitação nestas aplicações de estimação no que respeita ao número de parâmetros a estimar. Se for N o número de observações (por exemplo o numero de piezómetros em observação e/ou nascentes com caudais monitorizados), o número de parâmetros a estimar simultaneamente não pode ser superior a $N-1$. É claro de se podem fazer sucessivas corridas do programa para diferentes conjuntos de parâmetros, fixando os outros parâmetros.

A única situação em que se pode estimar um número de valores superior a $N-1$ é quando se utiliza a técnica dos *pilot points*, apenas prevista no programa *PEST*, como se verá adiante. Por essa razão foi este o programa mais intensamente utilizado no presente trabalho.

Embora saia fora do âmbito do presente trabalho a discussão das técnicas de modelação inversa, para o que se deverá consultar a bibliografia específica anteriormente referenciada, passa-se a descrever algumas características essenciais do programa *PEST*, sobretudo nos aspectos mais utilizados no presente caso de estudo.

PEST

A designação *PEST* é um acrónimo de *Parameter ESTimation*. A descrição detalhada do algoritmo Gaus-Marquardt-Levenberg utilizado no *PEST* consta do capítulo 2 do respectivo manual (Doherty, 2002).

O *PEST* faz a minimização de uma chamada “função objectivo” que não é mais do que a soma ponderada dos quadrados das diferenças entre as observações geradas pelo modelo (valores simulados) e as observações realizadas no terreno.

O programa prevê um factor de peso a atribuir aos diferentes tipos de observações, por exemplo níveis e caudais, de forma a tornar comparáveis parâmetros que podem ter ordens de grandeza muito diferentes. (por exemplo os caudais de nascentes deverão ter um factor de peso de 0,1, admitindo que podem atingir cerca de um milhar de metros cúbicos por dia, quando comparados com os níveis piezométricos se estes rondarem a cota +100). Este factor de peso deverá também

reflectir o grau de precisão das observações. Na presente utilização foi atribuído o factor 1 aos níveis piezométricos, enquanto que aos caudais de nascentes foi frequentemente atribuído um factor de peso de 0,01, atendendo ao facto de haver apenas uma estimativa de “caudais normais”, como será referido no capítulo 12.

Em modelos lineares, a optimização dos parâmetros não exige mais do que uma iteração. Na presente utilização chegou-se a atingir 20 iterações. No início de cada iteração, a relação entre os parâmetros do modelo e as observações por ele geradas (valores simulados) é linearizada, mediante a sua formulação como expansão de Taylor do conjunto corrente de valores dos parâmetros; são então calculadas as derivadas de todas as observações em relação a todos os parâmetros. Este problema linearizado é então resolvido para o melhor conjunto de valores paramétricos e, este novo conjunto de valores é então testado, correndo de novo o modelo. Através da comparação entre as alterações nos valores dos parâmetros e as melhorias alcançadas na função objectivo, na iteração corrente e nas iterações anteriores, o programa vai avaliar se vale a pena fazer nova iteração de optimização e, se for esse o caso, todo o processo é reiniciado. Nas aplicações realizadas, com vista a optimizar os valores de condutividade hidráulica e de armazenamento (cedência específica e armazenamento específico), foram normalmente utilizadas as transformadas logarítmicas dos parâmetros a optimizar, dado que foram investigadas gamas bastante alargadas de valores possíveis e, desta forma, pensa-se que se facilitará a linearização requerida no processo, poupando algumas iterações. Pelo menos numa situação simples de teste verificou-se esta situação, pelo que se passou a adoptar, de forma sistemática, esta possibilidade prevista no programa.

As derivadas das observações em relação aos parâmetros são calculadas utilizando diferenças finitas. Durante cada iteração de optimização o modelo corre uma vez por cada parâmetro a ajustar, acrescentando um pequeno incremento predefinido ao valor anterior desse parâmetro. As alterações resultantes nas observações simuladas são divididas por este incremento para calcular a derivada em relação a esse parâmetro. O procedimento repete-se em relação a cada um dos parâmetros a estimar. Esta técnica de cálculo de derivadas é referida como o método das “forward differences” (Doherty, 2002).

A técnica dos *pilot points*, anteriormente referida como uma capacidade específica do *PEST*, consiste numa técnica mediante a qual um parâmetro é estimado, não como um valor único, mas como um conjunto de valores espacialmente distribuídos. Assim, tomando como exemplo o presente caso de estudo, o parâmetro condutividade hidráulica horizontal de uma das camadas aquíferas pode ser representado por um conjunto de 20 “pilot points” espacialmente distribuídos em toda a extensão do aquífero, como se verá no capítulo 12.

Em termos de possibilidades, a técnica dos *pilot points* permite que se estime um número ilimitado

de valores de um parâmetro. O único constrangimento é o tempo de processamento. No presente caso de estudo, no processamento dos 20 *pilot points* relativos à condutividade hidráulica, aliado à estimação de mais quatro parâmetros, correspondentes ao armazenamento em cada um dos polígonos considerados, foi dispendido cerca de uma semana por cada uma das camadas assim otimizadas.

ÍNDICE DO CAPÍTULO 12

12	modelação numérica de fluxo	143
12.1	Modelação de aquíferos cársticos	143
12.2	Formulação em diferenças finitas utilizando o software Modflow	144
12.2.1	Condutância hidráulica	147
12.2.2	Armazenamento	152
12.3	Calibração e modelação inversa.....	154

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 12.1	Cálculo da condutância através de uma série de prismas (Harbaugh <i>et al</i> , 2000).....	148
Figura 12.2	Cálculo da condutância vertical entre dois nós de células (Harbaugh <i>et al</i> , 2000).....	151

13 MODELO REGIONAL DO AQUÍFERO MOURA-FICALHO

Desenvolveu-se um modelo de simulação do escoamento do aquífero Moura-Ficalho, em regime transitório, considerando um incremento de tempo mensal, entre 1 de Outubro de 2000 e 31 de Dezembro de 2005. Foi utilizada a interface Groundwater Modeling System (GMS), versão 5.1.

A melhor calibração foi alcançada com um modelo designado por MF38. Esta designação não surge por acaso - pretende reflectir o carácter preliminar deste modelo, sobretudo no que respeita ao valor da recarga que se admitiu, 38% da precipitação mensal, que se considera necessitar de revisão, no sentido de um valor inferior, como foi sugerido no capítulo 9 (Recarga do Aquífero Moura-Ficalho).

O capítulo foi subdividido em seis partes, desejando-se, desta forma apresentar uma síntese de todo o trabalho desenvolvido:

- Apresentação dos dados de base utilizados;
- Breve descrição de outros modelos antecessores do MF38;
- Apresentação detalhada do modelo MF38;
- Projecção de um cenário de evolução piezométrica do aquífero até ao ano 2015;
- Medidas contra a situação de sobreexploração;
- Discussão dos resultado e conclusões.

13.1 Dados de base

13.1.1 Recarga

Como já foi anteriormente referido a recarga foi considerada uma percentagem da precipitação observada nas três estações udométricas: Cerro das Canas (CCp), Vale de Vargo (VVp) e Sobral da Adiça (SA), assinaladas na Figura 13.1. Foram definidas as áreas de influência de cada estação, como se representa na mesma figura, através dos chamados polígonos de Thiessen. Os lados destes polígonos são matematicamente definidos como as bissetrizes perpendiculares dos segmentos de recta que unem os pontos considerados. Desta forma qualquer ponto no interior de um polígono situa-se mais próximo da estação udométrica correspondente a esse polígono do que a qualquer outra.

As observações de precipitação foram recolhidas com sensores ligados a sistemas electrónicos de aquisição de dados, numa base temporal horária. Houve, por isso, necessidade de fazer a agregação dos dados para uma base diária e depois para uma base mensal.

Para o preenchimento de valores em falta foram ainda consideradas as seguintes estações climatológicas da região, que também têm registos horários de precipitação: Herdade da Valada (HV), Monte da Torre (MT), Monte do Álamo (MA) e Fonte da Telha (FT).

As séries incompletas, em relação ao intervalo de tempo considerado no modelo, foram

completadas da seguinte forma:

- Séries horárias agregadas em dias (considerando as 9:00 como mudança de dia);
- Séries diárias cumulativas, em períodos de tempo completos, foram correlacionadas entre si, definindo as equações de regressão e os índices de correlação correspondentes;
- Dos pares de estações próximas, foram seleccionados os que apresentam um índice de correlação superior;
- Foram completados os dias em falta utilizando as equações de regressão linear encontradas para cada caso;
- Os dados diários foram agregados numa base mensal.

As várias taxas de recarga utilizadas na modelação foram aplicadas aos dados de base assim preparados (Anexo II) e foram criados os ficheiros correspondentes com os valores de recarga em $m^3/dia/m^2$.

Na Tabela 13.1 apresenta-se a síntese anual dos valores de precipitação considerados. Deve notar-se que o primeiro ano do período de simulação foi um ano chuvoso e o último ano completo foi um ano seco. Considera-se desta forma que o período de tempo de simulação em regime transitório poderá ser representativo das condições climáticas desta área de estudo, em que ciclicamente se observam fenómenos de seca (Costa, *et al*, 2006b).

Tabela 13.1 - Valores anuais de precipitação considerados.

ano	SA	CCp	VVp	Precipit. ponderada	Observações
2000-01	714,3	805,9	745,4	741.25	ano chuvoso
2001-02	572,4	581,6	540,8	555.59	
2002-03	487,5	490,5	426,6	453.60	
2003-04	564,0	530,4	535,2	544.31	
2004-05	196,6	264,2	122,8	162.12	ano seco
2005-06	190,1	213,2	236,0	218.30	ano incompleto

Em termos de recarga para as simulações foram apenas consideradas as áreas de afloramento de rochas carbonatadas que constituem o aquífero Moura-Ficalho, retiradas do levantamento geológico. Os polígonos correspondentes foram subdivididos de acordo com as áreas de influência de cada uma das três estações consideradas (CCp, VVp e SA) (Figura 13.1). Na Tabela 13.6, a coluna identificada como precipitação ponderada, reflecte a precipitação ocorrida na área de recarga do aquífero, considerando as diferentes áreas de influência. O valor médio anual dos cinco anos hidrológicos completos é 490 mm, revelando algum défice de precipitação, se for considerado o valor médio anual de 550 mm.

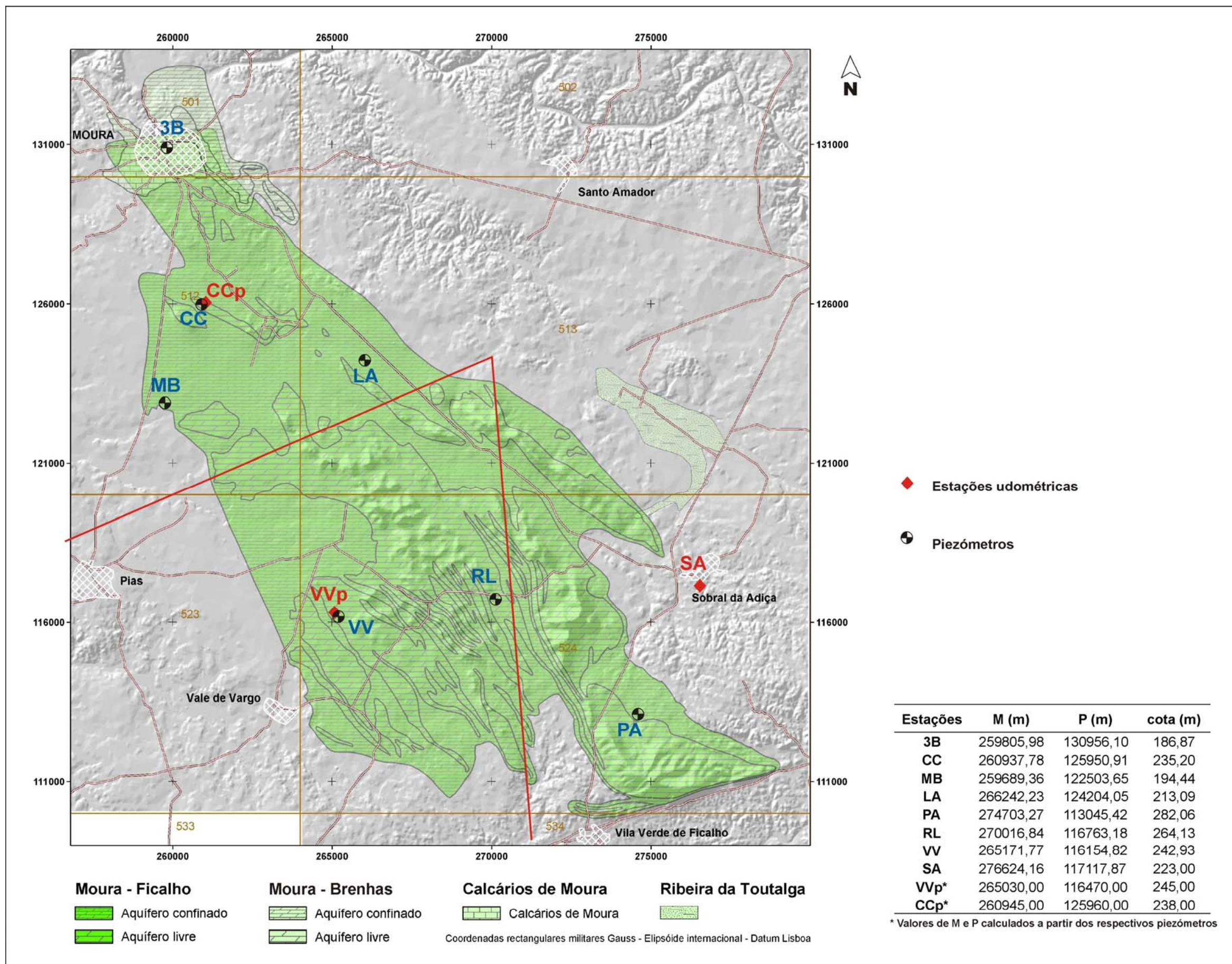


Figura 13.1 - Áreas de influência das estações udométricas e divisão dos polígonos de recarga.

13.1.2 Níveis piezométricos

Foi utilizada a rede de monitorização específica implementada e equipada no âmbito do projecto ERHSA (2001).

Os níveis piezométricos do aquífero Moura-Ficalho foram registados igualmente numa base horária, através de sensores de pressão ligados a sistemas electrónicos de aquisição de dados. Na generalidade dos piezómetros foram utilizados sensores com compensação da pressão atmosférica. O sistema consiste em dois sensores de pressão, um submerso a profundidade conhecida e outro à superfície, fazendo-se automaticamente a compensação das leituras do sensor submerso com base nas leituras do sensor de superfície. Assim a variação de pressão lida resultará da variação da carga da coluna de água. A localização de cada um destes piezómetros também consta da Figura 13.1.

A recolha de dados de níveis, tal como sucedeu com os dados de precipitação, foi feita com um computador portátil, em deslocações regulares ao terreno. Muito embora a autonomia do equipamento utilizado fosse superior, constatou-se que a periodicidade ideal para fazer este trabalho é trimestral. Esta conclusão resulta da necessidade de se proceder a limpeza do equipamento e de ser demasiado arriscado utilizar intervalos de tempo maiores pois, embora se tenham utilizado várias marcas de equipamento (*Datalogger*, *Global Water* e *In-Situ*), existe sempre a necessidade de verificar as condições de funcionamento e a qualidade dos dados registados e fazer mesmo algumas correcções, como adiante se verá.

O único piezómetro que foi equipado com um sistema de tele-transmissão de dados via rede móvel foi o piezómetro *SD3Bicas1* (representado na Figura 13.4 por *3B*). Como se pode observar nas fotografias da Figura 13.2, foi instalada uma estação hidrogeológica em que se mediam simultaneamente o nível piezométrico, a precipitação, a temperatura do ar e a humidade da água no solo. Este furo tem a particularidade de ser repuxante (Costa, 2001). Neste caso foi instalado um único sensor de pressão na cabeça do furo e foi implementado um sistema de medição por observação em manómetro. O sistema funcionou bem entre 30 de Março de 2001 e 30 de Setembro de 2002. Por dificuldades económicas e técnicas o sistema deixou de funcionar correctamente.

Nos restantes piezómetros os dispositivos utilizados foram do tipo do que se mostra na fotografia da Figura 13.3.

Independentemente das operações de calibração, surgem normalmente diferenças entre os níveis registados no dispositivo e os níveis medidos manualmente. É o que pode designar-se por *erros de instrumentação*. Entre quaisquer duas ocasiões (t_i e t_f) em que se observaram níveis (NO), os níveis registados (NR) foram corrigidos (NC) de acordo com a Equação 13-1. Os índices i, t , e f

identificam os termos da série temporal (inicial, no instante t e final, respectivamente).



Figura 13.2 – Piezómetro *SDTrêsBicas* (vistas exterior e interior).



Figura 13.3 – Manutenção no piezómetro Rosa da Lavada (RL).

Equação 13-1

$$NC(t) = NR_t - \frac{(NR_f - NO_f) - (NR_i - NO_i)}{t_f - t_i} \cdot (t - t_i) - NR_i + NO_i$$

Basicamente admite-se que os erros observados variam linearmente ao longo do intervalo de tempo

considerado. Foi preparada uma pequena aplicação em linguagem Visual Basic (programação de Alain Francés) para fazer as correcções nas séries temporais de níveis horários, arquivadas em ficheiros Excel. Foram estes valores corrigidos que foram considerados, os valores do final de cada mês, para preparar os ficheiros de níveis utilizados na calibração dos modelos (Anexo III).

13.1.3 Nascentes e descargas ocultas

Uma nascente é um local onde a água subterrânea emerge à superfície, sem qualquer sistema artificial de bombagem. Assim podem ser mais ou menos artificializadas, desde que o fluxo seja natural. No presente caso de estudo, além de nascentes existem outras descargas naturais do aquífero, em que o fluxo se dá, não à superfície mas sim subterraneamente, para as formações geológicas adjacentes. São o que se designa, neste trabalho, por descargas ocultas. Neste trabalho, nascentes e descargas ocultas são simuladas com células do tipo dreno.

Nas células do tipo dreno, se o potencial hidráulico do aquífero for superior à cota da base do dreno, existe uma saída de água do aquífero. O caudal é directamente proporcional à diferença de potenciais hidráulicos, sendo a constante de proporcionalidade a condutância hidráulica (L^2T^{-1}), como se referiu no capítulo 12.

Os caudais das nascentes não são tão fáceis de medir como os níveis e, sobretudo, não se consegue instalar instrumentação de medição e registo automático com tanta facilidade.

De facto, normalmente as nascentes são aproveitadas para vários fins pelo Homem e, desta forma constatou-se a impossibilidade prática de instalar descarregadores com sistemas de aquisição de dados para controlo dos caudais de nascentes. Chegou a ser projectado um sistema de controlo de caudais na Ribeira de Brenhas, baseado em sensores de ultra-som mas, antes de ser solicitada a respectiva autorização ao organismo de tutela, já um particular tinha alterado as condições de escoamento do local seleccionado, com vista a captar água da Ribeira.

Apenas foi possível fazer medições de caudal com micromolinetes em ocasiões específicas. A precisão destas medições é baixa, apesar dos trabalhos de regularização do leito e limpeza das margens realizados. O método baseia-se na discretização da secção do canal a medir em subsecções consideradas uniformes e na medição da velocidade de fluxo correspondente, representando o respectivo produto o caudal que passa em cada subsecção. O somatório dos vários caudais parciais corresponderá ao caudal total na secção em observação.

Durante o período em observação, apenas foi possível estimar um caudal para cada uma das nascentes identificadas, de forma a hierarquizar as várias nascentes. Este caudal foi considerado na simulação, sendo o principal parâmetro de controlo, durante a calibração, para a condutância hidráulica das nascentes. A cota das nascentes foi determinada por observação de levantamentos topográficos e, no caso da nascente do Gargalão, por nivelamento topográfico de vários pontos do

leito da Ribeira de São Pedro.

Na Tabela 13.2 são apresentadas as características das nascentes, representadas no mapa da Figura 13.4. Faz-se a distinção entre nascentes e grupos de nascentes. Na mesma figura representam-se igualmente as descargas ocultas do aquífero.

Tabela 13.2 - Nascentes do aquífero consideradas nos modelos regionais como drenos.

	M (m)	P (m)	cota (m)	Condutância Hidráulica (m ² /d)	Elevação da base (m)	Caudal observado (m ³ /h)
N. Gargalão	273932,71 274037,81 274714,57 274873,99	118671,08 118777,75 118320,66 119328,67	190	0,13	193,59 192,80 191,67 190,64	-70,0
N. Enfermarias	261800,00	128620,00	190	115,00	183	-40,0
N. Monte Branco	259959,35	122697,97	190	50,00	185	-14,6
N. Messangil	265677,32	112517,49	234	7,00	232	-4,2
N. Ficalho	273089,75	109969,14	240	10,00	240	-6,7
N. Rosal	278240,43	111250,60	240	13,00	238	-5,4
SDM11	262633,00	129109,00	155	0,40	-234	-6,7

13.1.4 Furos de captação

Os furos que constam do inventário hidrogeológico da região, feito com base na identificação no terreno de todos os pontos de água, foram subdivididos em tipos de acordo com a informação disponível sobre caudais de captação e tempos de funcionamento ao longo do ano.

Apenas foi possível obter dados sobre volumes captados lidos directamente em caudalímetros, em alguns furos de abastecimento público. Mesmo assim, foi necessário preencher algumas falhas, por avaria no equipamento, assumindo-se nessas situações pontuais, extracções iguais às do ano anterior em igual período.

Foram ainda consultados os seguintes sites: INSAAR - Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Água e de águas Residuais – (<http://insaar.inag.pt/>) e Censos 2001, resultados provisórios, (<http://www.ine.pt/censos2001/>), neste último caso no que respeita à população.

A origem principal de abastecimento público, na área de estudo, é a Fonte da Telha, constituída por dois furos principais e um terceiro secundário, como foi referido no item 11.3.5. As novas origens construídas em 2004, como também já foi referido, ainda não entraram em funcionamento. Apenas se obtiveram, junto dos serviços técnicos da Câmara Municipal de Moura, os volumes totais mensais captados no conjunto dos três furos (por medição em caudalímetro instalado na entrada para o depósito de água). Como tal, na simulação foi apenas considerado um furo, designado *Fonte da Telha*, que representa o conjunto dos três furos que abastecem a cidade de Moura (9222

habitantes). No gráfico do lado esquerdo da Figura 13.5, representa-se a evolução temporal do caudal nesta origem.

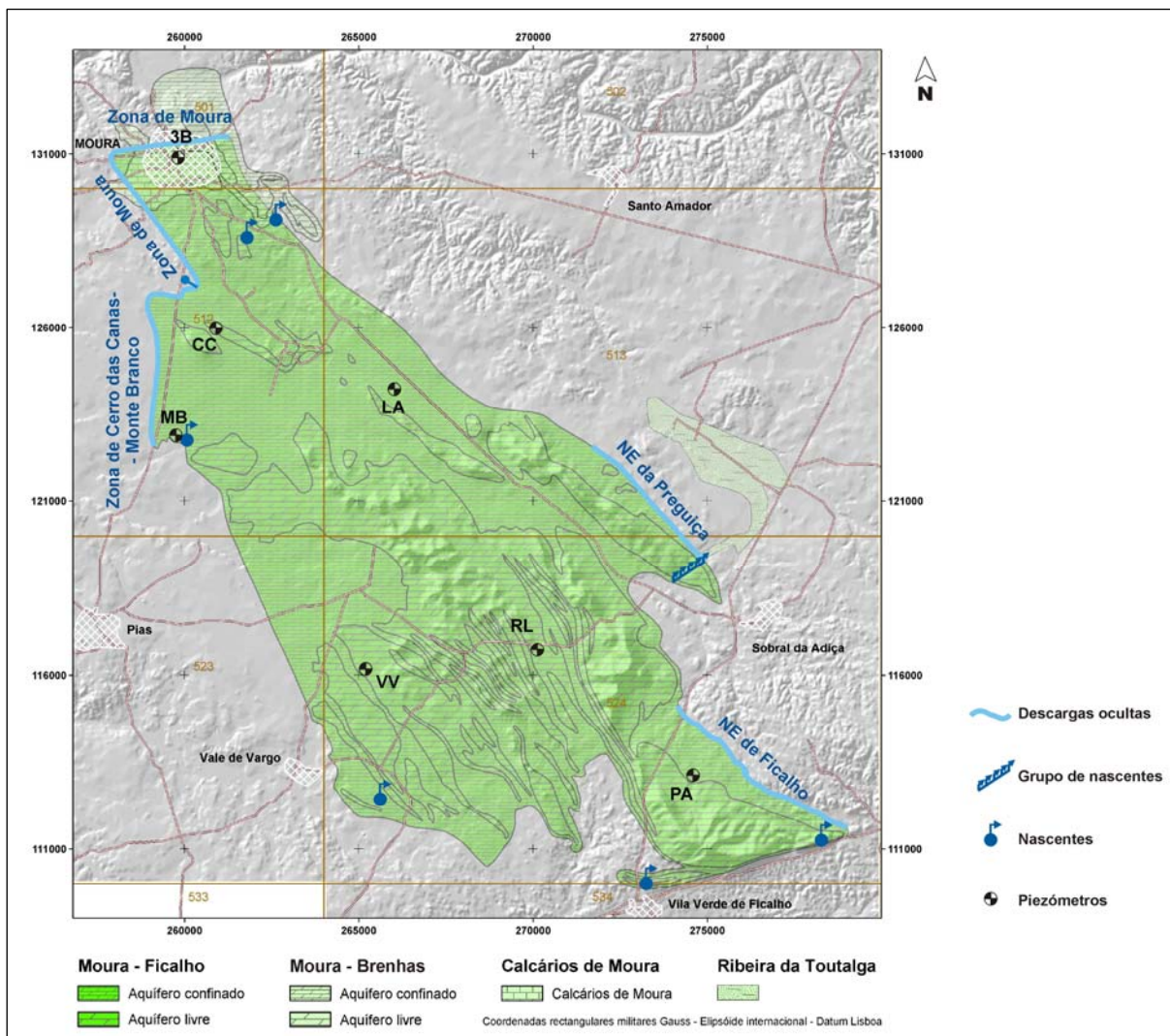


Figura 13.4 – Localização de nascentes e descargas ocultas.

Em relação à origem de abastecimento público de Sobral da Adiça (cerca de mil habitantes), constituída pelos dois furos do Gargalão, como foi referido no item 11.3.4, também apenas foi possível obter os totais mensais do conjunto dos dois furos. Em termos de simulação foi considerado apenas um furo designado por *Gargalão*. Note-se que as perdas da rede de adução e distribuição neste sistema são extremamente elevadas e, estas perdas não retornam ao aquífero, uma vez que a povoação se situa completamente fora deste.

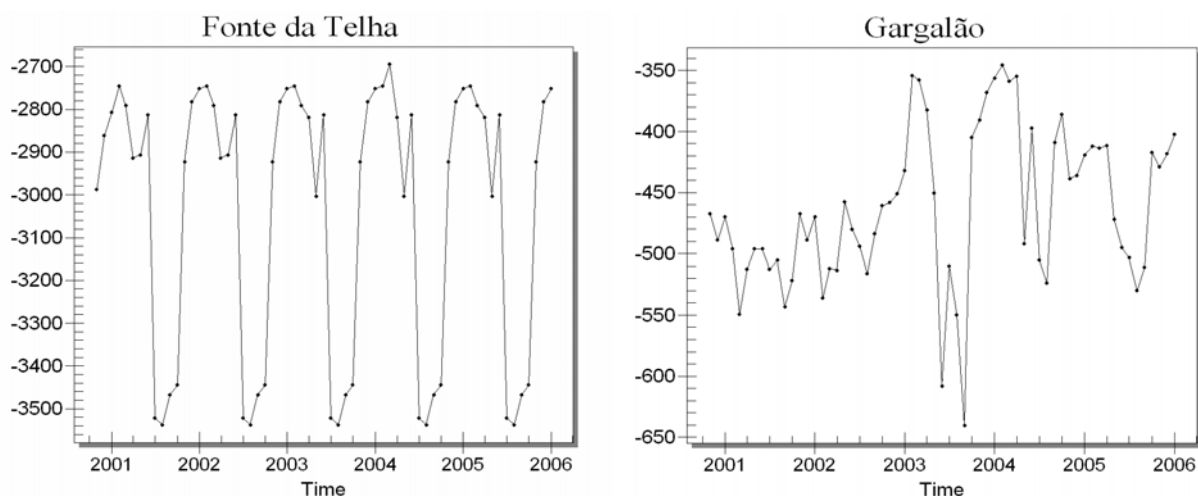


Figura 13.5 – Evolução dos caudais (m^3/dia) captados nas origens Fonte da Telha e Gargalão .

Em relação aos outros furos de abastecimento público, pertencentes ao concelho de Serpa, não foi possível obter uma informação do mesmo tipo. Perante discrepâncias que foram detectadas entre o último censo da população (2001) e o INSAAR, entendeu-se que seria mais realista assumir o furo *Gargalão* como padrão de variação de volumes captados.

Assim, em relação às origens de abastecimento a Pias, Vale de Vargo e Vila Verde de Ficalho, admitiu-se que a evolução dos caudais de captação é do tipo *Gargalão*.

O abastecimento a Pias e Vale de Vargo, com uma população superior a quatro mil habitantes, é assegurado pelo conjunto de três furos de Herdade das Cortes. Tendo em conta o número de pessoas servidas por este sistema parece haver uma subavaliação dos caudais captados, mas atendendo a que a rede de adução não é tão antiga como a de Sobral de Adiça, as perdas de água serão inferiores e, por isso, pensa-se que a estimativa deverá estar próxima da realidade.

No caso de Vila Verde de Ficalho, com 1446 habitantes, como o sistema de captação corresponde a um conjunto de um furo e um poço que são explorados de forma bastante bizarra, com bombagem do primeiro para o segundo, onde se faz a captação para o depósito (situação anómala para a qual se fez o devido alerta na proposta de perímetro de protecção correspondente, incluída no Relatório final do ERHSA (2001)), também foi considerado o designado *furo da serra* como representativo deste conjunto. Foi assumido que os caudais seriam do tipo *Gargalão*, admitindo-se que a realidade não será muito diferente deste cenário.

No que respeita aos furos utilizados na agricultura, as dificuldades e incertezas são ainda maiores. Assim procurou-se identificar situações tipo, susceptíveis de constituir aproximações aos caudais efectivamente captados.

Neste contexto, a Herdade dos Machados que é a principal casa agrícola da região, constitui um

tipo singular próprio, pois existem seis furos que são utilizados, quer para abastecimento do monte e de instalações agrícolas, como lagares, queijaria, instalações pecuárias, etc., quer para, durante o período seco, alimentarem um pivot de rega, entre outros sistemas menores de regadio. Neste caso apenas foi possível avaliar a variação ao longo do ano dos caudais captados com base em considerações como consumos energéticos, número de horas de funcionamento dos diferentes furos e respectivos caudais, etc.. Obteve-se, assim uma variação mensal ao longo de um ano “normal”. Na simulação foi considerado apenas um furo designado *Herdade dos Machados*, que é o maior consumidor de água do aquífero, cujo caudal se apresenta no gráfico do lado esquerdo da Figura 13.6.

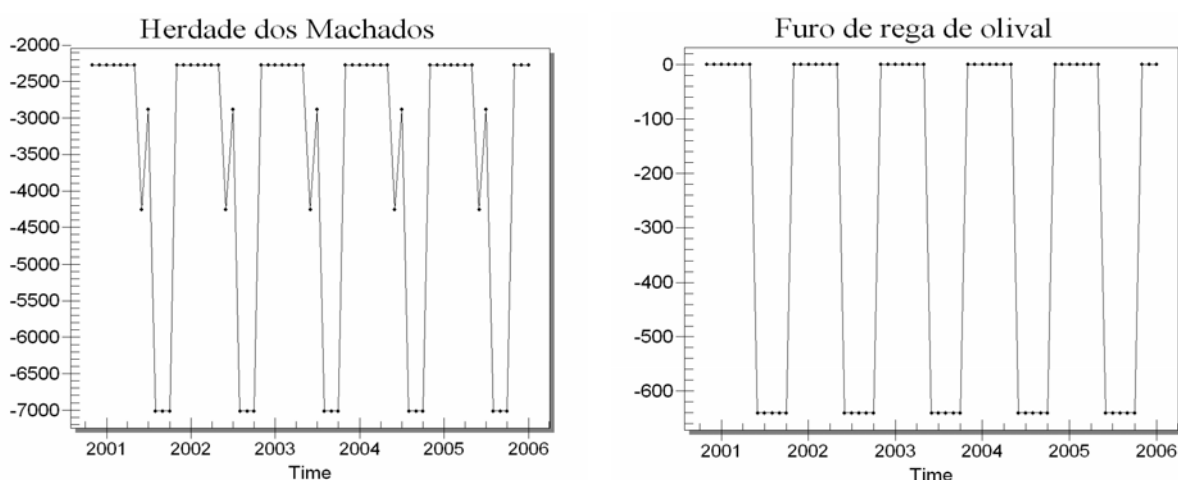


Figura 13.6 – Evolução de caudal (m³/dia) de furos tipo Herdade dos Machados e furo de rega de olival.

Foram ainda identificados furos, situados em terrenos isolados sem quaisquer habitações próximas, que são utilizados no abastecimento de sistemas de rega, sobretudo sistemas de rega gota a gota, em vastas extensões de olival. Alguns destes furos são antigos enquanto que outros só entraram em funcionamento a partir de 2004. Ambas as situações foram contempladas nas simulações, considerando um caudal diário nulo durante os meses do período húmido (Outubro a Maio) e -640 m³/dia, durante os meses do período seco (Maio a Setembro). O gráfico respectivo consta do lado direito da Figura 13.6.

Outra situação tipo identificada caracteriza-se por regadios de muito menores dimensões, em que habitualmente o mesmo furo é utilizado na rega e noutros consumos agrícolas, incluindo o consumo doméstico e corresponde ao designado por *Furo de abastecimento agrícola e rega*.

Há também furos com uma utilização sazonal mas que se destinam à rega de pequenas hortas, sobretudo em áreas próximas de Moura e foram designados por *Furo horta*, ainda que não tenham que ser verdadeiras hortas. Os dois tipos antes referidos estão representados nos gráficos da Figura 13.7.

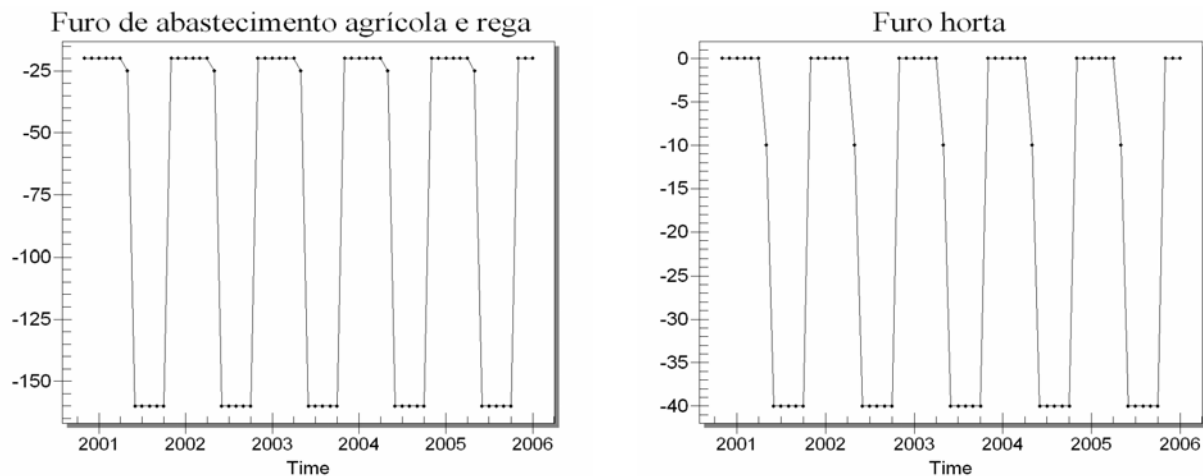


Figura 13.7 – Caudais (m^3/dia) dos tipos *furo de abastecimento agrícola e rega* e *furo horta*.

Em síntese, os furos que captam este aquífero foram classificados nos seguintes tipos:

- a) T1 – Fonte da Telha;
- b) T2 - Gargalão;
- c) T3 – Herdade dos Machados;
- d) T4 - Furo de rega de olival;
- e) T5 – Furo novo de rega de olival;
- f) T6 - Furo de abastecimento agrícola e rega;
- g) T7 - Furo horta.

No mapa da Figura 13.8 pode ver-se a distribuição espacial dos furos considerados na simulação de escoamento, classificados segundo os vários tipos de furos.

No anexo IV são incluídos as coordenadas e classificação dos furos utilizados na simulação, tal como os caudais dos furos tipo considerados.

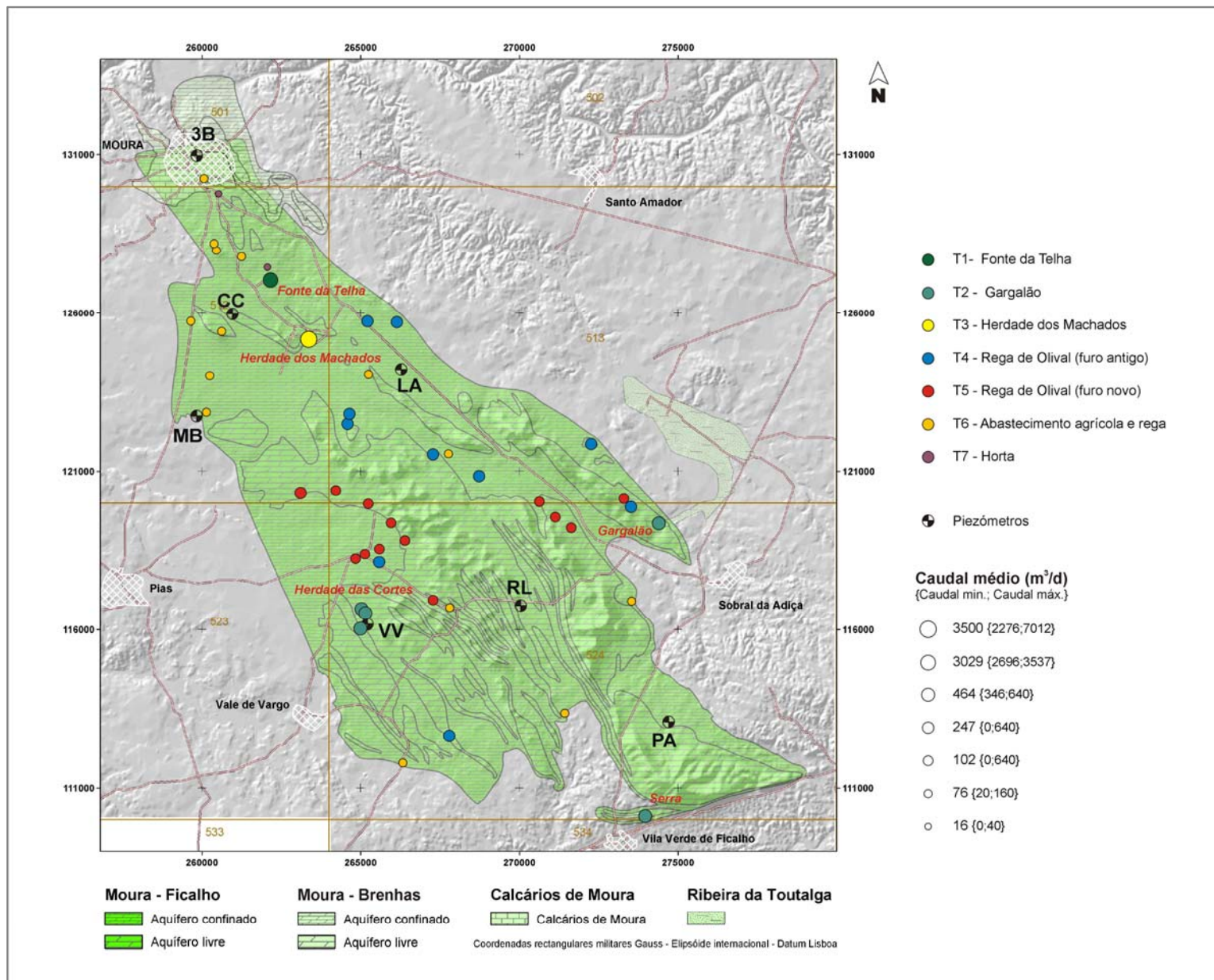


Figura 13.8 – Localização dos furos, classificados pelos respectivos caudais médios durante todo o período de simulação.

13.2 Evolução do Modelo Moura-Ficalho e discretização espacial

O primeiro modelo de escoamento desenvolvido para este aquífero foi um modelo em regime permanente, constituído apenas por uma camada plana de células, conforme se pode observar na ficha do aquífero Moura-Ficalho do ERHSA (Costa, 2001). A tentativa de desenvolver este modelo inicial para a simulação em regime transitório revelou-se infrutífera. Houve necessidade de reformular vários aspectos conceptuais, pelo que o modelo inicial foi abandonado.

Nos modelos desenvolvidos para a simulação do escoamento em regime transitório, foi necessário considerar mais do que uma camada de células, em consonância com sugestões de autores que têm utilizado modelos de diferenças finitas em aquíferos cársicos (Scanlon, *et al.*, 2003). Assim, no novo modelo conceptual considerou-se:

- Uma circulação mais profunda, num meio de menor condutividade hidráulica horizontal, que de alguma forma explicasse as relativamente reduzidas amplitudes piezométricas e de caudais de nascentes;
- Mais zonas de nascentes ocultas, além das que já tinham sido consideradas na zona urbana de Moura e com fluxos mais importantes;
- A morfologia das camadas, constituindo dobras anticlinais separadas por sinclinais.

Desta forma surge um modelo numérico baseado numa malha de células de quatro camadas, constituindo as dobras geológicas, com condutividade hidráulica horizontal decrescente em profundidade, em que apenas a primeira é de tipo convertível (livre/confinado) e as restantes são do tipo confinado. É o que pode designar-se por modelo dobrado.

Com base neste modelo já foi possível obter curvas piezométricas que reflectiam o andamento geral das curvas piezométricas observadas. Contudo, não sendo satisfatória a calibração alcançada houve necessidade de reformular de novo o modelo conceptual, desta vez com várias simplificações, que se traduziram no desenvolvimento de um modelo com uma malha de células plana e horizontal, com apenas duas camadas, em que a primeira se comporta sempre como um aquífero livre e a segunda como um aquífero confinado. É o que pode designar-se por modelo simples.

13.2.1 Modelo dobrado

Utilizando as ferramentas informáticas disponíveis no software *GMS*, versão 5.1, articulada com o *ArcGis*, foi possível gerar uma malha de células de diferenças finitas para o *Modflow-2000*, com uma forma que pretende representar a discretização tridimensional do aquífero (ver Figura 13.11).

No ambiente *GMS*, a partir da versão 5.1, uma das formas de gerar uma rede de células de diferenças finitas para o *Modflow*, consiste em criar sólidos que, posteriormente são utilizados para

gerar as malhas. Foram definidos os sólidos que se representam na Figura 13.9, sendo o sólido superior a camada confinante, utilizado para gerar a cota do tecto das células da camada 1, o sólido seguinte foi subdividido para gerar as camadas 1 e 2 e o sólido mais profundo foi utilizado para gerar as células das camadas 3 e 4 da parte inferior do aquífero. O confinante corresponde aos níveis de vulcanitos do topo do Complexo vulcano-sedimentar de Moura-Santo Aleixo e às coberturas cenozóicas, enquanto o aquífero corresponde à fácies carbonatada do mesmo complexo vulcano-sedimentar e das Dolomias de Ficalho. Para se obter esta geometria foram considerados, além dos *logs* de sondagens carotadas profundas, mais de uma centena do que foi designado por *sondagens virtuais* (Figura 13.10).

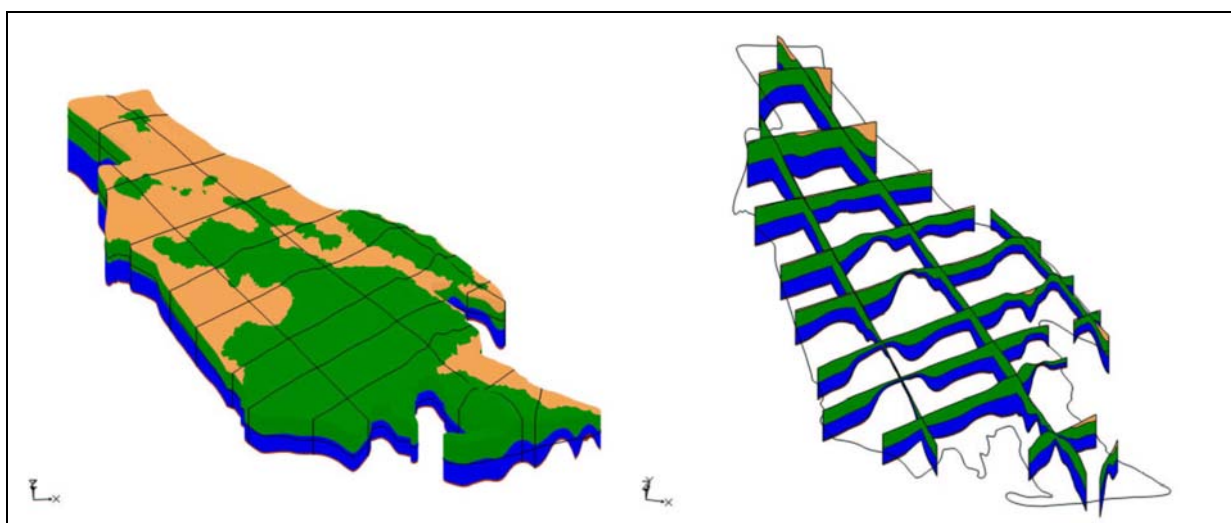


Figura 13.9 - Sólidos gerados no ambiente *GMS*, utilizando *tins* criadas em *ArcView*.

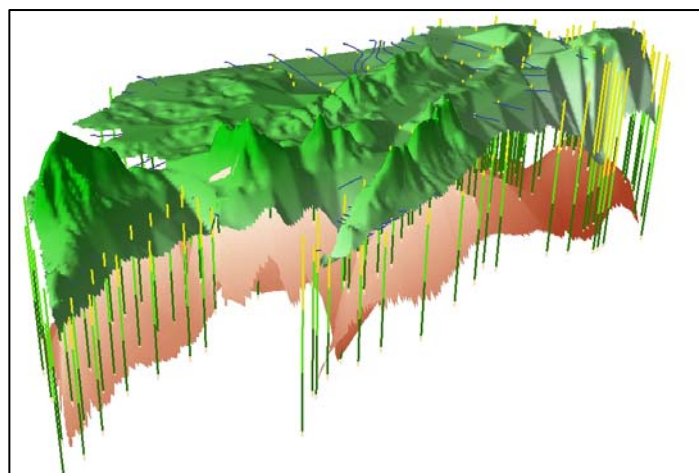


Figura 13.10 – Sólidos gerados em ambiente *ArcGis* com base em sondagens virtuais.

As *sondagens virtuais* não são mais do que sondagens imaginárias em que, a partir da cota do

terreno se imaginou a cota a que seriam intersectadas as diferentes camadas do aquífero, tendo em consideração, em primeiro lugar os *logs* das sondagens reais que se efectuaram na região e em segundo lugar a informação geológico-estrutural que permite prever a sequência que seria atravessada numa sondagem vertical nesse local.

A partir dos sólidos gerados criou-se uma malha de células com duas camadas para cada uma das partes, superior e inferior, do aquífero, como se representa na Figura 13.11. Apenas as camadas 1 e 2 incluem células do tipo furo e do tipo dreno com as quais se simulam os furos, as nascentes e as descargas ocultas, deste aquífero. As camadas 3 e 4 apenas permitem fluxos entre si e com as células das camadas superiores.

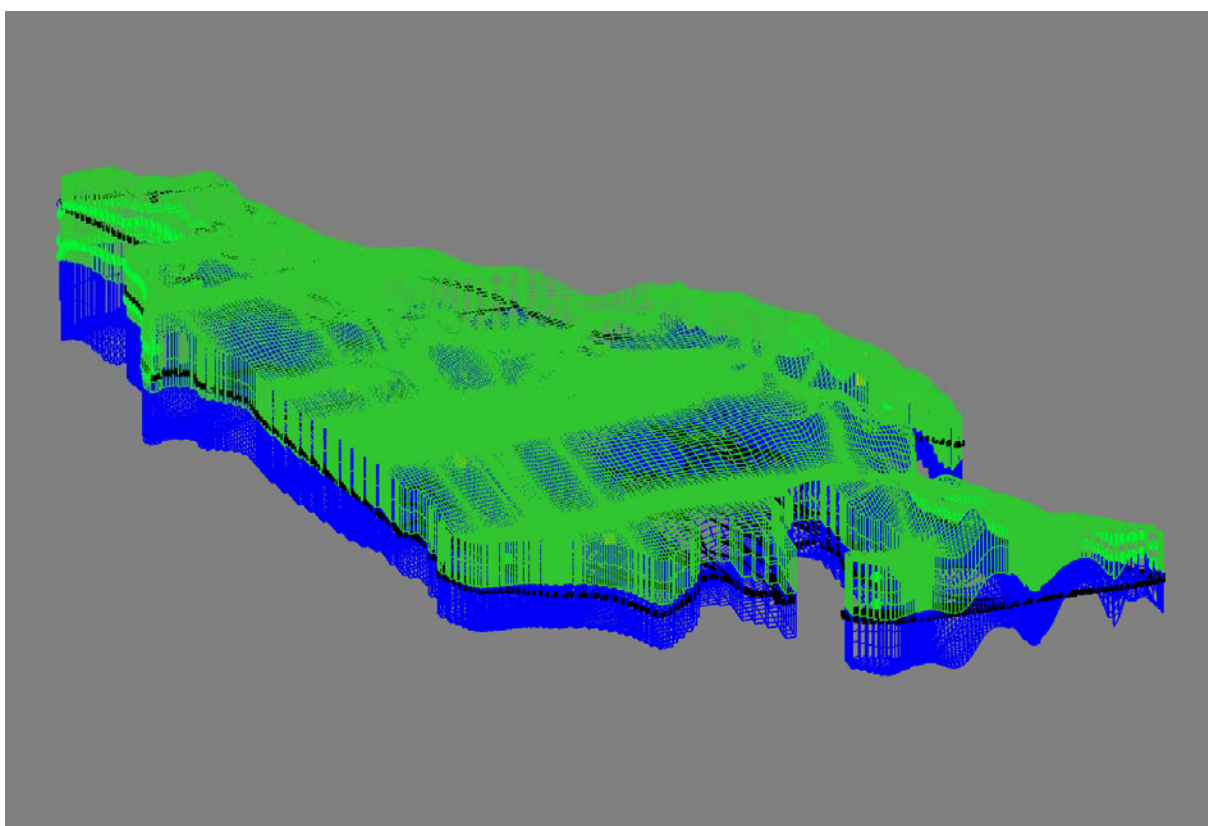


Figura 13.11 - Malha de células utilizada no modelo dobrado.

A recarga foi considerada 40% da precipitação observada, como foi referido no capítulo 9.

A condutividade hidráulica diminui em profundidade, sendo apenas a camada superior do tipo misto livre/confinado, conforme a posição relativa do potencial hidráulico e do tecto do aquífero. As restantes camadas são do tipo confinado.

No que respeita às características hidráulicas das camadas foram considerados os quatro domínios designados P1 a P4, que se representam na Figura 13.12.

A subdivisão das camadas nos quatro domínios procura reflectir realidades hidrogeológicas

diferenciadas:

- P1 – a camada 1 é essencialmente confinada, chegando a apresentar condições de artesianismo repuxante. A condutividade hidráulica é elevada, devendo a capacidade de armazenamento ser baixa.
- P2 – são ainda dominantes as condições de confinamento, embora já se faça a transição para o domínio P3.
- P3 – são predominantes as condições de aquífero não confinado, sendo mais elevadas a capacidade de armazenamento associada a uma condutividade hidráulica, globalmente baixa. Neste domínio, essencialmente de recarga do aquífero, existe uma clara diminuição da condutividade hidráulica com a profundidade.
- P4 – é o domínio onde predominam as características cársicas mais desenvolvidas. A capacidade de armazenamento é elevada e a redução em profundidade dos parâmetros hidráulicos não é tão acentuado, reflectindo um desenvolvimento cársico muito profundo e um elevado grau de fracturação, provavelmente relacionado com a proximidade do bordo sul da zona de Ossa-Morena (cavalgamento de Ferreira-Ficalho).

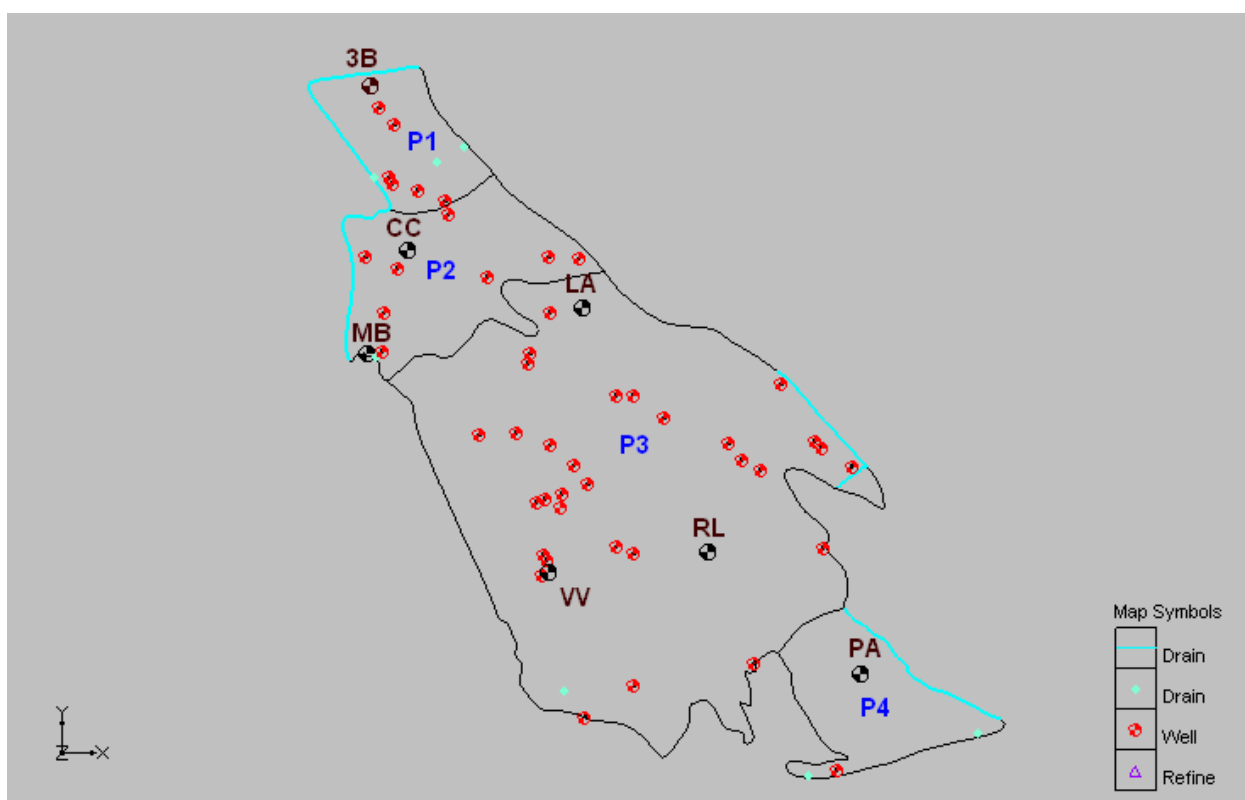


Figura 13.12 – Representação dos quatro domínios, P1 a P4, em que foram subdivididas cada uma das camadas 1 e 2.

Depois de se ter tentado especificar anisotropias horizontais e verticais na condutividade hidráulica,

concluiu-se que este aumento de complexidade no modelo não se traduziu numa melhoria da calibração alcançada. Assim adoptou-se o factor 1, quer para a anisotropia horizontal quer para a vertical. Desta forma a condutância hidráulica vertical entre as camadas seguirá um padrão de variação espacial essencialmente determinado pela variação espacial da condutividade hidráulica horizontal das duas camadas adjacente, assumindo um valor intermédio, conforme formulação apresentada no capítulo 12.

Tentou-se otimizar a calibração alcançada com recurso a técnicas de modelação inversa. Foram utilizados os programas *PEST*, *ModflowP* e *UCODE*. Concluiu-se não ser possível utilizar qualquer *software* de modelação inversa neste modelo por existirem células secas no domínio de simulação. As células que secam, pelo menos durante alguns períodos do tempo de simulação, situam-se na camada superior, nas zonas de fecho dos principais relevos. Assim, depois de se tentar evitar estas células secas de várias formas, inclusive por alteração das dimensões locais destas células, resolveu-se modificar o modelo conceptual, adoptando-se um modelo mais simples, plano e horizontal.

Na Figura 13.13 representam-se as células da camada 1, correspondente à situação em 1 de Outubro de 2001. Pode verificar-se a relação entre as células secas (assinaladas a vermelho) e a morfologia do terreno, reflectindo as estruturas anticlinais do substrato geológico.

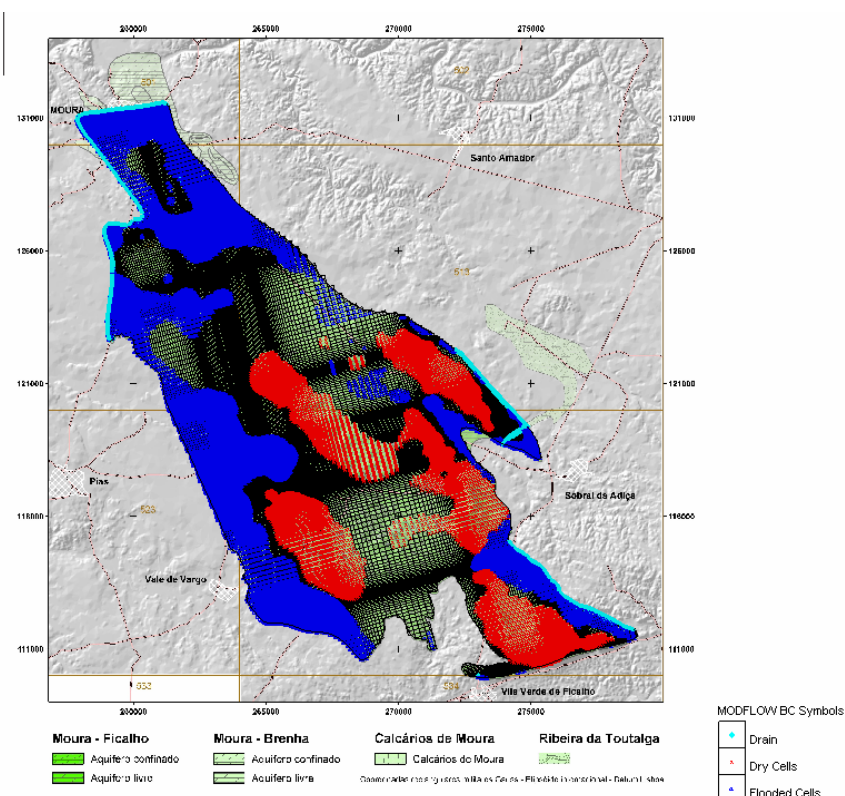


Figura 13.13 - Malha de células da camada 1 do modelo dobrado.

As células inundadas, que se apresentam a azul-escuro, correspondem a células do tipo convertível. Identificam-se ainda as células do tipo dreno, pelo menos as que se situam no perímetro do aquífero.

As curvas piezométricas observadas e simuladas com este modelo constam da Figura 13.16, onde podem ser confrontadas, entre si e com as simuladas pelo modelo simples, que se passa a descrever.

13.2.2 Modelo simples

No modelo simples foram consideradas apenas duas camadas planas e horizontais, situando-se o topo da camada 1 (superior) à cota +400 m, a base à cota zero e a base da camada 2 situa-se à cota -400. Na Figura 13.14 representa-se a malha de células utilizada. Nestas condições, em termos de modelo de escoamento, a camada superior é toda ela permanentemente do tipo livre e a inferior do tipo confinado, sendo o topo do aquífero representado pela superfície freática.

A recarga foi mantida em 40% da precipitação e mantiveram-se igualmente as simplificações respeitantes às anisotropias horizontais e verticais da condutividade hidráulica.

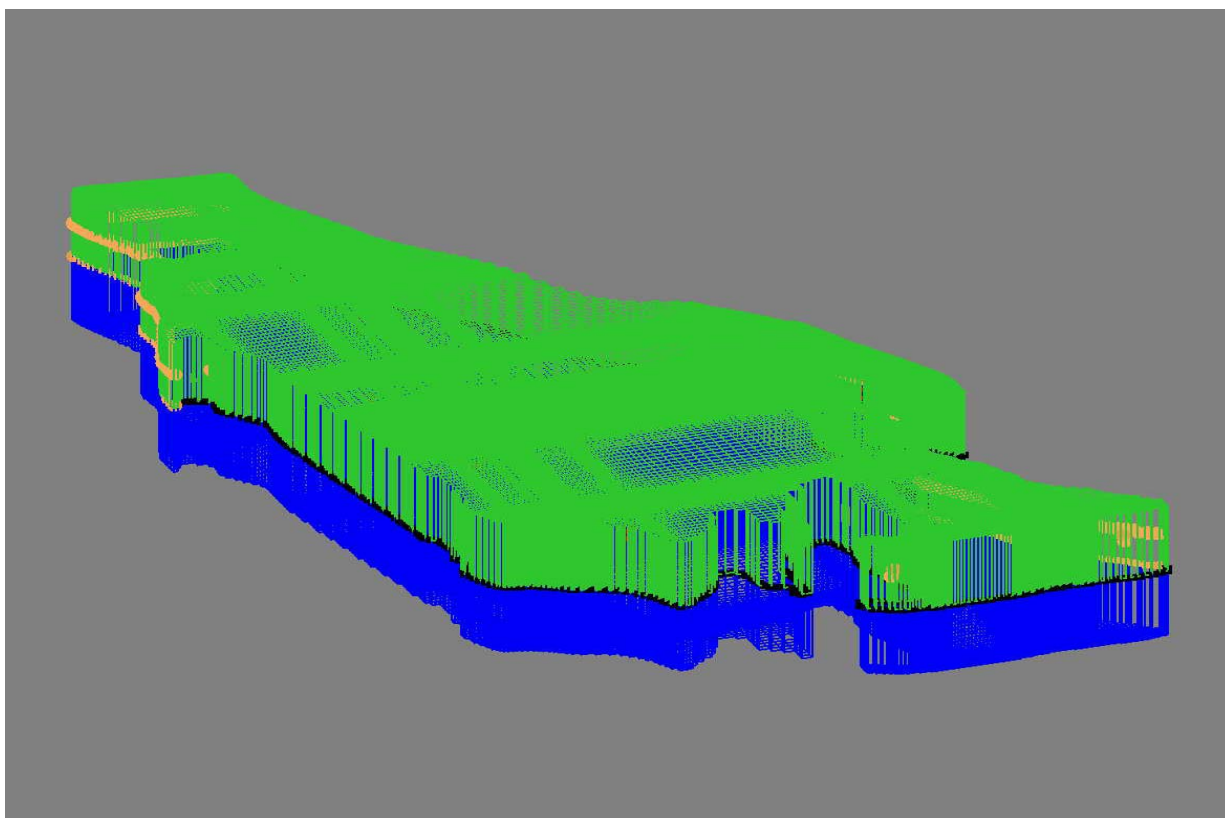


Figura 13.14 – Malha de células das camadas 1 (verde) e 2 (azul) do modelo simples.

Após uma calibração manual aproximada, essencialmente controlada pelos níveis piezométricos mas atendendo também aos valores resultantes dos caudais das nascentes, passou a utilizar-se a modelação inversa, de acordo com o referido no capítulo 12. No essencial foi otimizada a camada 1, no que se refere à condutividade hidráulica horizontal representada por 20 *pilot points* distribuídos pela área do aquífero (Figura 13.15) e, no que se refere à cedência específica, foram estimados quatro parâmetros correspondentes aos polígonos P1 a P4 (Figura 13.12), em que foi dividido o domínio de simulação. Uma vez otimizada a camada 1, os valores dos parâmetros estimados para esta camada foram fixados e procedeu-se de forma similar em relação à camada 2, envolvendo neste caso o armazenamento específico.

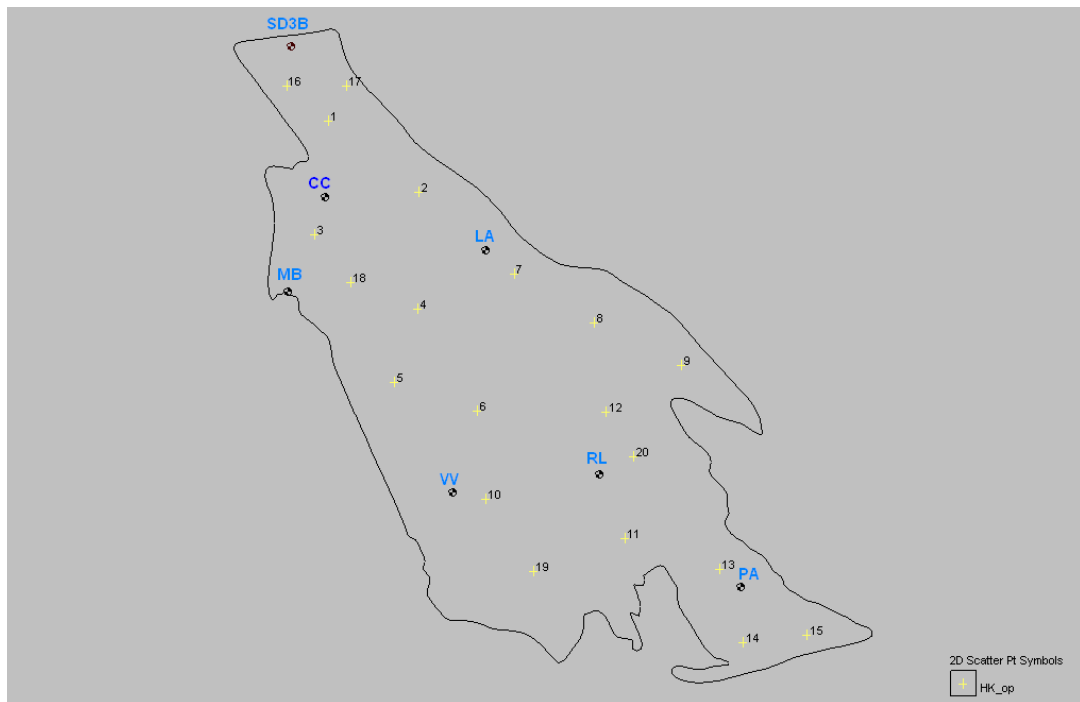


Figura 13.15 – Distribuição espacial dos “pilot points” utilizados na otimização da condutividade hidráulica das camadas 1 e 2.

Foi atribuído um factor de peso de 0,01 às observações de caudais de nascentes e de 1 aos níveis piezométricos, de acordo com o exposto no capítulo 12.

Na Figura 13.16. podem comparar-se os níveis piezométricos observados com os valores simulados pelo modelo dobrado e pelo modelo simples, depois de calibrado.

No que se refere aos níveis a calibração alcançada afigura-se satisfatória; contudo fez-se uma análise crítica das características hidráulicas do aquífero segundo este modelo e o resultado foi uma nova reformulação do modelo, com redução da recarga

MODELAÇÃO MATEMÁTICA DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS DA REGIÃO DE MOURA

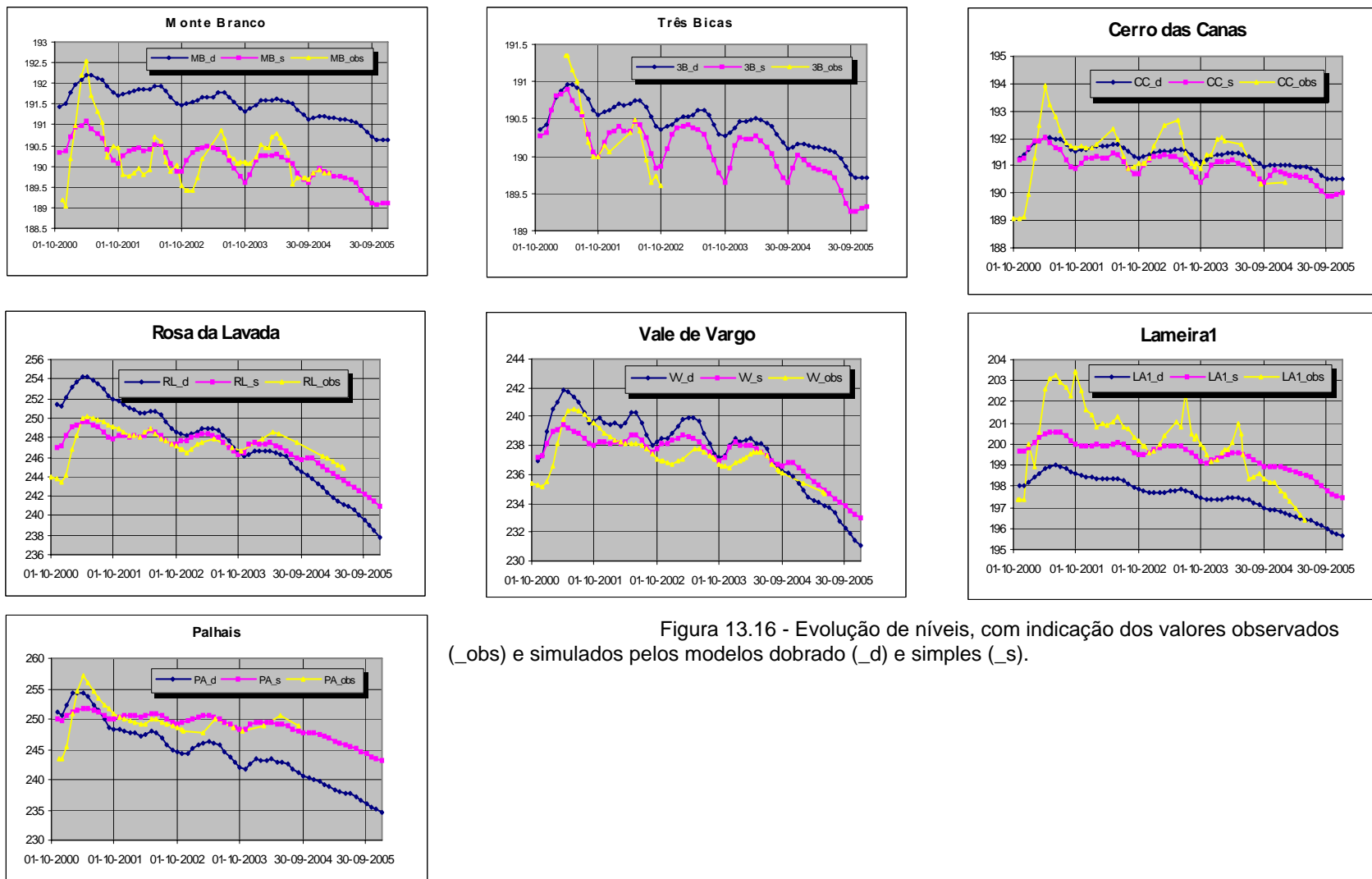


Figura 13.16 - Evolução de níveis, com indicação dos valores observados (_obs) e simulados pelos modelos dobrado (_d) e simples (_s).

O facto de o armazenamento específico (SS) do polígono P4 da camada 2 ser $0,009 \text{ m}^{-1}$, embora minimize o erro de simulação (valor estimado com o *PEST*), não tem significado físico. De facto, o coeficiente de armazenamento (S) é o produto do armazenamento específico (SS) pela espessura do aquífero (b), o que daria um valor superior a 1. É claro que se deveria ter restringido mais o domínio de variação deste parâmetro de forma a excluir estas soluções matematicamente correctas mas sem significado físico.

O facto de se terem entretanto obtido estimativas de recarga significativamente inferiores aos valores inicialmente encontrados, como foi referido no capítulo 9, também contribuiu para a definição do sentido desta alteração. Foi assim desenvolvido o modelo *MF38* que, como foi anteriormente referido ainda corresponde apenas a mais um passo no sentido de um modelo de facto representativo do aquífero Moura-Ficalho.

13.3 Modelo MF38

Este partiu do *modelo simples* anteriormente descrito. Foi alterado o valor de recarga, que passou de 40% para 38% da precipitação mensal, mantendo as características hidráulicas a que se havia chegado por modelação inversa. Naturalmente assistiu-se a um rebaixamento generalizado dos níveis e caudais simulados, mas aumentou o erro do modelo.

13.3.1 Calibração e resultados obtidos

Repetiu-se todo o procedimento de optimização de condutividade hidráulica horizontal, com a técnica dos *pilot points* e dos parâmetros de armazenamento. Alcançou-se uma calibração semelhante à anteriormente alcançada, sem alterar quaisquer outros parâmetros, como sejam as condutâncias de nascentes e outras descargas do aquífero.

Na Figura 13.17 representam-se os erros de simulação do modelo *MF38*.

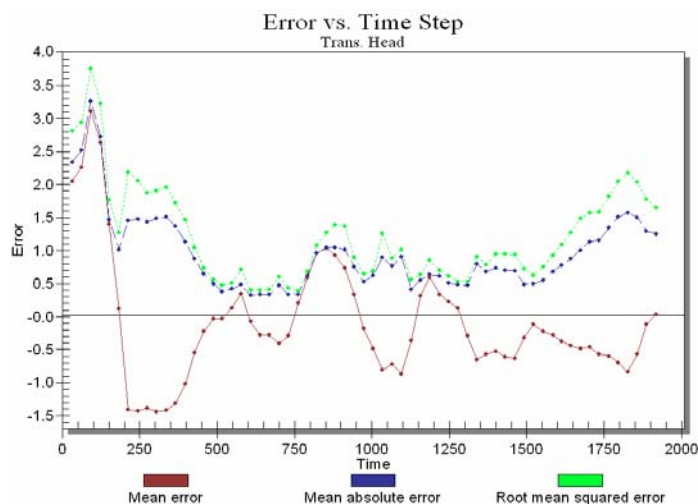


Figura 13.17 – Erros médios de simulação do modelo *MF38*.

Como seria de esperar os erros médios maiores observam-se no início e no fim do período de calibração, reflectindo as situações climáticas extremas abrangidas. Salvo nestas situações os erros médios são inferiores a 1,5 metros, o que se afigura aceitável, atendendo a que o andamento geral das curvas piezométricas simuladas e observadas em cada local é similar (Figura 13.18).

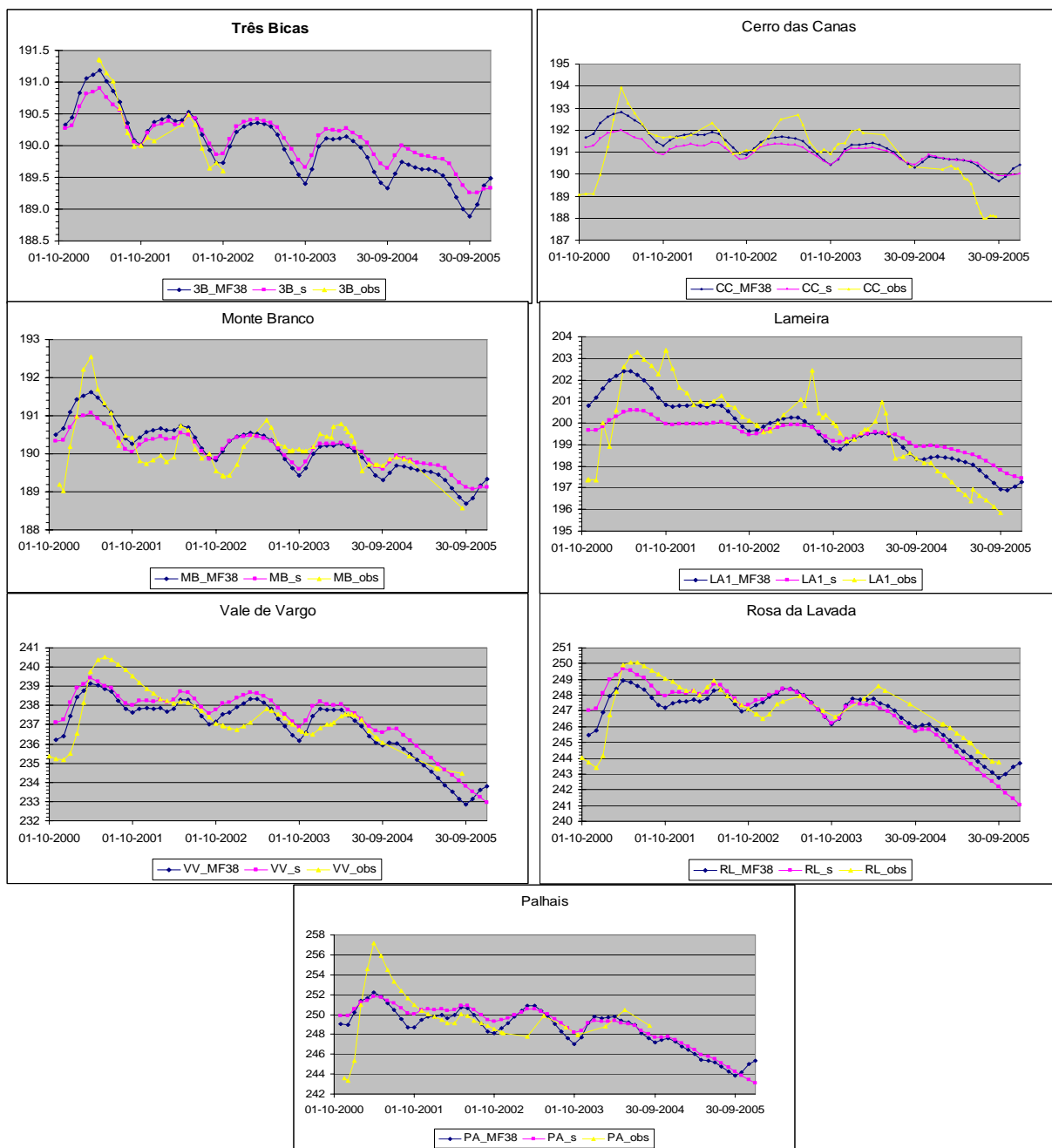


Figura 13.18 – Níveis piezométricos simulados, pelos modelos MF38 e simples (_s) e observados.

No anexo IV apresentam-se os níveis simulados e observados quer do *modelo simples* quer do modelo *MF38*.

Para se visualizarem as características hidráulicas do aquífero, segundo este modelo *MF38*, foram calculadas as transmissividades (T) e os coeficientes de armazenamento (S) de cada uma das camadas 1 e 2.

A transmissividade é o produto da condutividade hidráulica horizontal (HK) pela espessura do aquífero (b). No caso da camada 1, b corresponde à espessura saturada e, como esta é variável no tempo, em rigor fixou-se a data de 1 de Dezembro de 2001 e considerou-se esta situação no cálculo da transmissividade que se representa na Figura 13.19. Esta figura representa um mapa de transmissividade do aquífero que parece corresponder a uma boa aproximação da realidade reconhecida na região.

Em relação à camada 2, a transmissividade representa-se na Figura 13.20. Este mapa não terá a mesma importância do anterior, não só por esta camada se situar a profundidades que fazem a sua exploração economicamente inviável, como poderá afastar-se mais da realidade, faltando elementos para a sua validação.

Na Tabela 13.3 são apresentados os valores otimizados de cedência específica (SY) e de armazenamento específico (SS) correspondentes aos quatro polígonos representados na Figura 13.12, relativos às camadas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 13.3 - Valores de cedência específica e de armazenamento específico otimizados para os polígonos.

Armazenamento	P1	P2	P3	P4
SY camada 1	2,77E-04	1,51E-02	2,30E-02	8,50E-03
SS camada 2 (m ⁻¹)	6,50E-07	2,94E-08	6,01E-05	7,18E-04

Pode constatar-se que, ao contrário do que sucedeu com o *modelo simples*, neste caso o valor de armazenamento específico do polígono P4, com um valor de 0.00071794 m⁻¹, corresponderá a um coeficiente de armazenamento de 2,87E-01, o que, sendo um valor elevado, já tem significado físico.

Com base nos valores que constam da Tabela 13.3 e nas características geométricas do modelo *MF38*, calculou-se a capacidade total de armazenamento de água do aquífero em cada uma das suas camadas, como se pode observar na Tabela 13.4. O armazenamento total do aquífero Moura-Ficalho será da ordem de 3.983 hm³, dos quais mais de 3.000 hm³ correspondem a água armazenada em profundidades que atingem, frequentemente, mais de seis centenas de metros.

A capacidade de armazenamento de cada camada, decomposta pelos quatro polígonos (P1 a P4) consta da Figura 13.21.

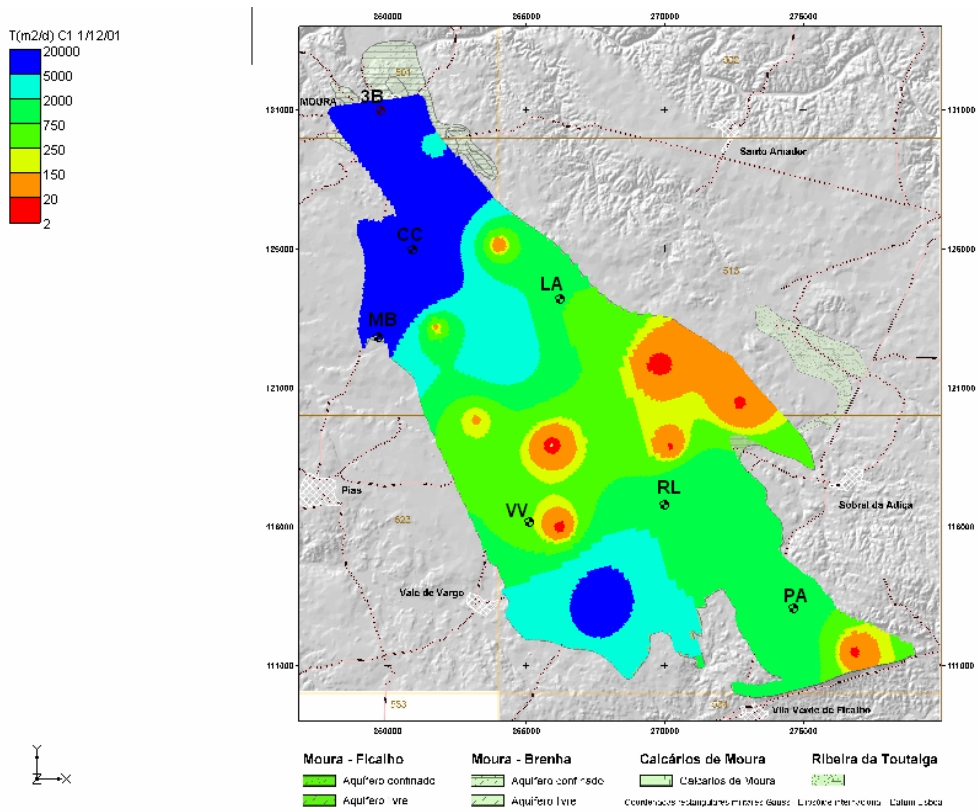


Figura 13.19 – Mapa de transmissividade da camada 1 (modelo MF38).

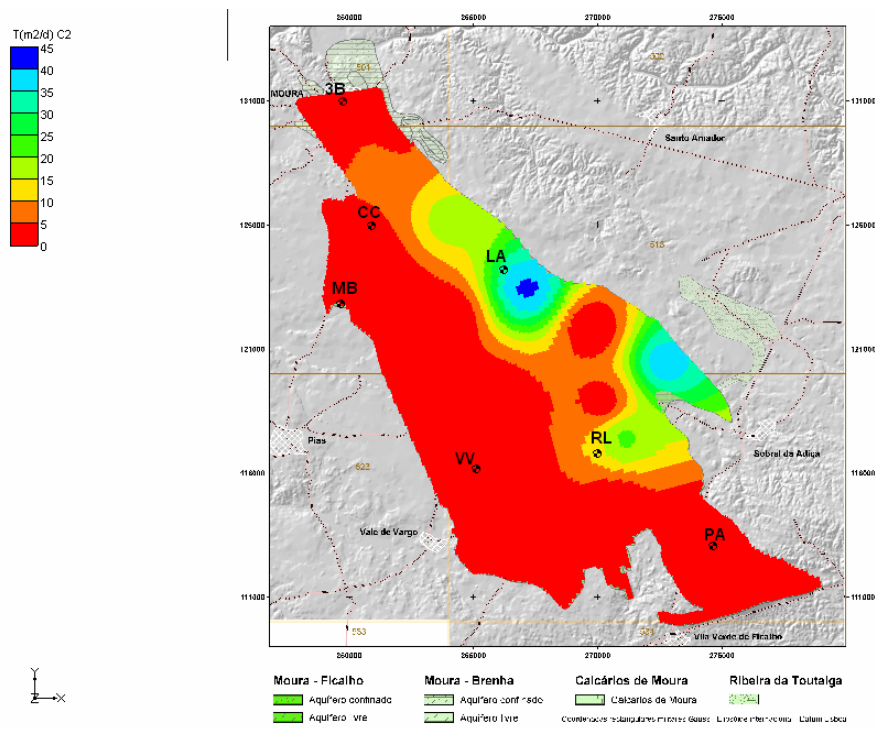


Figura 13.20 – Mapa de transmissividade da camada 2 (MF38).

Tabela 13.4 - Volumes de água envolvidos no modelo regional.

MF38	Polígono->	P1	P2	P3	P4	Totais
Vol. Tot. (hm ³)	camada 1	2,63E+03	5,10E+03	2,75E+04	4,46E+03	39.686
	camada 2	5,53E+03	1,06E+04	4,85E+04	7,20E+03	71.802
S	camada 1	2,77E-04	1,51E-02	2,30E-02	8,50E-03	-
	camada 2	2,60E-04	1,18E-05	2,40E-02	2,87E-01	-
Vol. água (hm ³)	camada 1	7,27E-01	7,72E+01	6,33E+02	3,79E+01	749
	camada 2	1,44E+00	1,25E-01	1,16E+03	2,07E+03	3.234
	Total (hm ³)	2,16E+00	7,73E+01	1,80E+03	2,11E+03	3.983

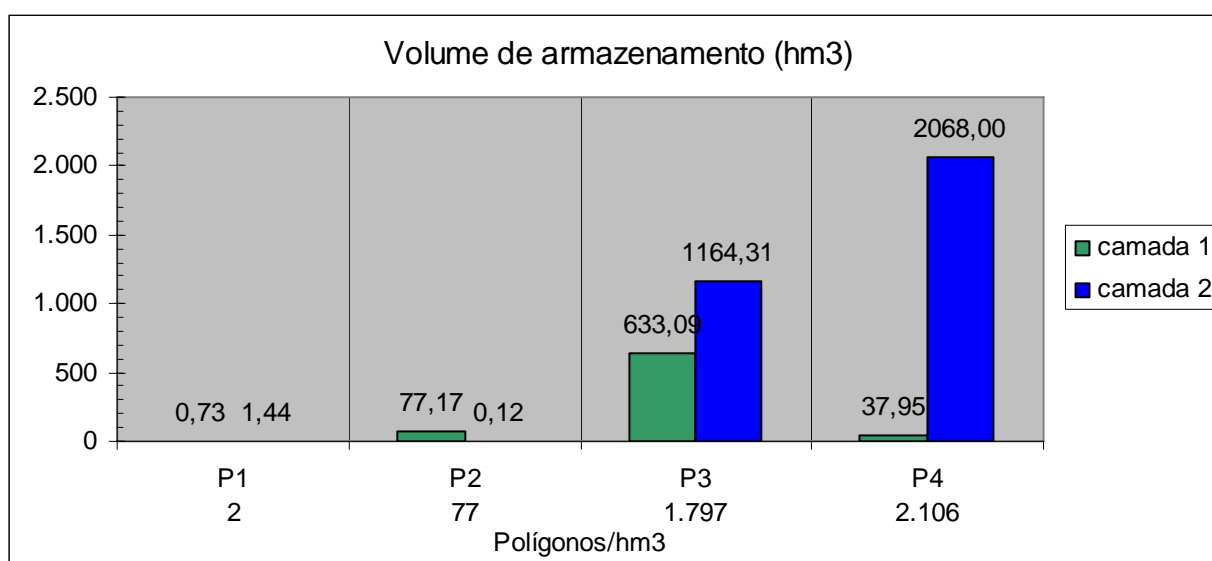


Figura 13.21 – Capacidade de armazenamento do aquífero Moura-Ficalho, por camadas e por polígonos, segundo o modelo MF38.

Constata-se que o armazenamento se faz principalmente na camada 2, nos polígonos P4 e P3. Em relação à camada 1, a maior parte do armazenamento ocorre na área do polígono P3.

Os cálculos efectuados referem-se à capacidade total de armazenamento. Como se verá seguidamente, o balanço anual de entradas e saídas do sistema não ultrapassa normalmente os 20 hm³, o que parece em consonância com as idades encontradas no único local que capta directamente água da camada profunda (*SDM11-Casal de Santo André*), como foi referido no capítulo 10. A capacidade de armazenamento que foi avaliada representará de facto um limite máximo de reservas hídricas. Mesmo conceptualmente é impossível captar toda esta água, ainda que, do ponto de vista técnico e económico, fosse possível construir uma densa rede de furos de captação com profundidades superiores a 600 metros. De facto, com os valores de condutividade hidráulica que caracterizam a camada 2, os rebaixamentos que teriam que se impor para elevar

toda esta água profunda, só por si já representaria um nível piezométrico relativamente elevado, a que corresponderia, adoptando a terminologia das barragens, um volume morto muito significativo. É claro que muito antes de se colocarem estas questões, haveria que salvaguardar os caudais mínimos necessários do ponto de vista ambiental, nomeadamente os volumes que anualmente se escoam através das descargas naturais, que por vezes representam um importante factor para o equilíbrio ecológico da região e para a qualidade de vida das populações locais.

13.3.2 Balanço hídrico

Na Figura 13.22 representa-se os termos do balanço de entradas e saídas do sistema ao longo dos meses envolvidos na simulação, expressos em caudais médios diários. É bem visível o período final de menor recarga e nota-se também o incremento nas extracções por furos a partir do verão de 2004.

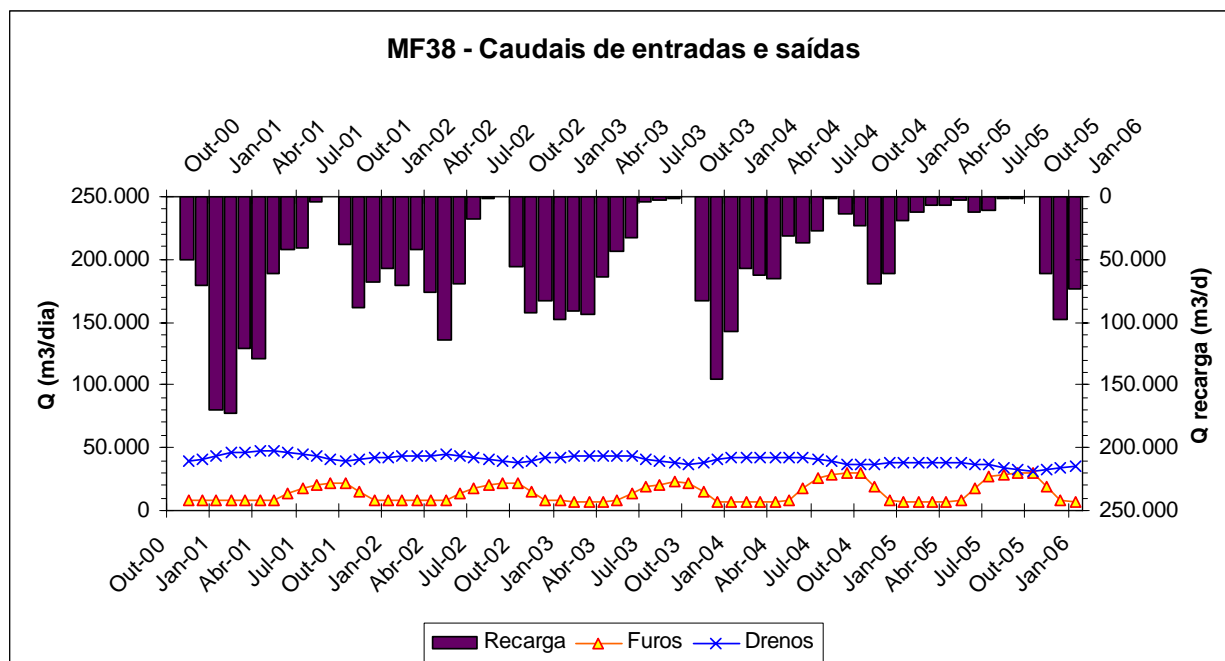


Figura 13.22 – Caudais envolvidos no modelo MF38, ao longo de toda a simulação.

A representação do balanço de entradas e saídas em termos de caudais mensais, considerando como valores negativos os meses em que saiu mais água do que entrou, consta da Figura 13.23. Note-se que o último período em que foi mobilizada mais água do armazenamento do que a que entro se situa entre Dezembro de 2004 e Setembro de 2005, o que corresponde a um período de dez meses consecutivos.

Fazendo-se o balanço cumulativo dos volumes de água entrada e saída, resulta o gráfico da Figura 13.24, onde se pode observar que a partir de Março de 2005 o balanço global entra em valores

negativos, atingindo-se um valor mínimo de $-10,12 \text{ hm}^3$, no final de Setembro de 2005.

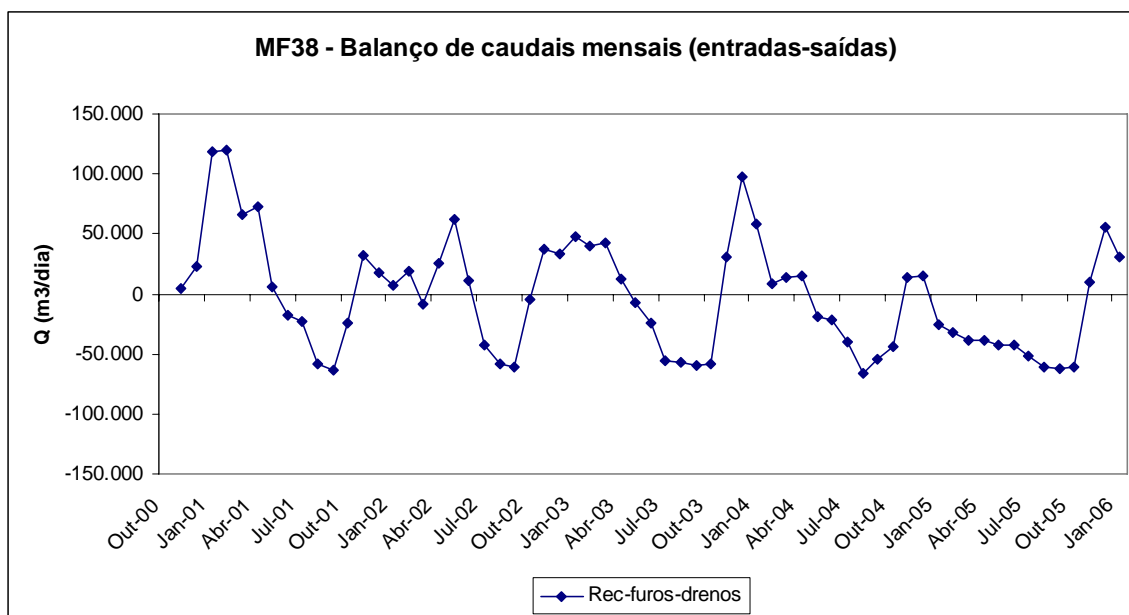


Figura 13.23 - Balanço entre os caudais médios mensais de recarga e de água saída por células do tipo furo e células do tipo dreno.

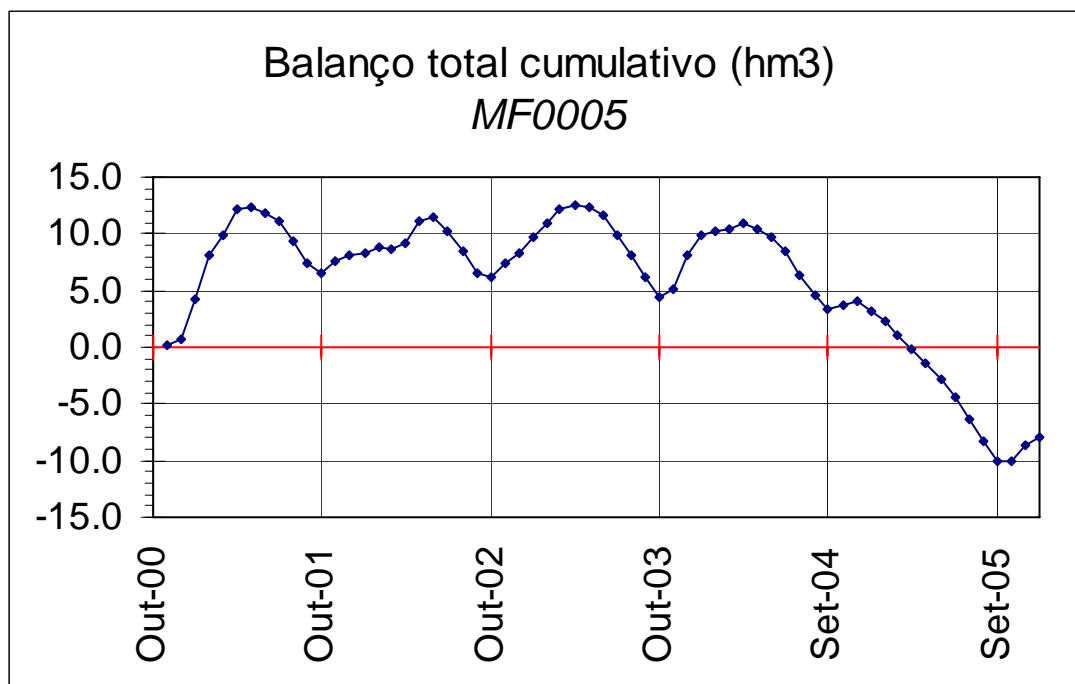


Figura 13.24 - Balanço cumulativo entre os volumes de água entrada e saída.

Como já foi anteriormente referido, o balanço de entradas e saídas de água do aquífero ronda os 20

hm³/ano. Na Tabela 13.5 apresentam-se os totais de entradas e saídas do aquífero ao longo do período de simulação. A análise desta tabela permite constatar que apenas o primeiro ano foi húmido e que o último ano hidrológico completo foi muito seco. O balanço geral, representado pela coluna de totais, em particular a última linha, permite constatar que não foram repostos 7,92 hm³ de água de armazenamento, durante os cinco anos e três meses do período de simulação.

Tabela 13.5 - Balanço hídrico anual do armazenamento no período de simulação.

Ano	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06 (i)	Total
recarga	27,12	19,96	18,39	19,80	6,22	6,31	97,80
STO_in	7,55	6,20	8,66	8,17	14,76	1,08	46,41
STO_out	14,14	5,83	6,85	7,07	1,31	3,29	38,49
STOout-in	+6,59	-0,37	-1,81	-1,10	-13,44	+2,21	-7,92

Valores em hm³
(i) -apenas 1º trimestre

A análise dos resultados permite concluir que, em relação ao período considerado, o aquífero se encontra em sobreexploração. Deve notar-se que, considerando apenas os cinco anos hidrológicos completos para avaliação da situação, o défice total é de -10,13 hm³.

No sentido de melhor analisar o problema detectado e procurar soluções, fizeram-se as projecções até 2015, conforme se passa a descrever.

13.4 Projecção da simulação do aquífero até 2015

Foi referido anteriormente que o período de simulação envolveu, inicialmente um ano húmido e no final um ano hidrológico seco. Os anos intermédios foram ligeiramente secos (vide Tabela 13.5).

Fez-se uma projecção do comportamento do aquífero até ao ano de 2015, admitindo a repetição das condições de recarga observadas entre 1 de Outubro de 2000 e 30 de Setembro de 2005, durante os dois quinquénios seguintes. Admitiu-se igualmente que as características das extracções se mantiveram tal como se observaram no último ano hidrológico do período de calibração, o que significa que não foram considerados quaisquer aumentos de consumos.

O modelo assim desenvolvido, *MF0015*, permite simular a evolução de níveis nos vários piezómetros sendo o resultado apresentado nos gráficos da e da Figura 13.26.

Note-se que os níveis mínimos absolutos são atingidos no último mês de simulação, em relação a todos os piezómetros.

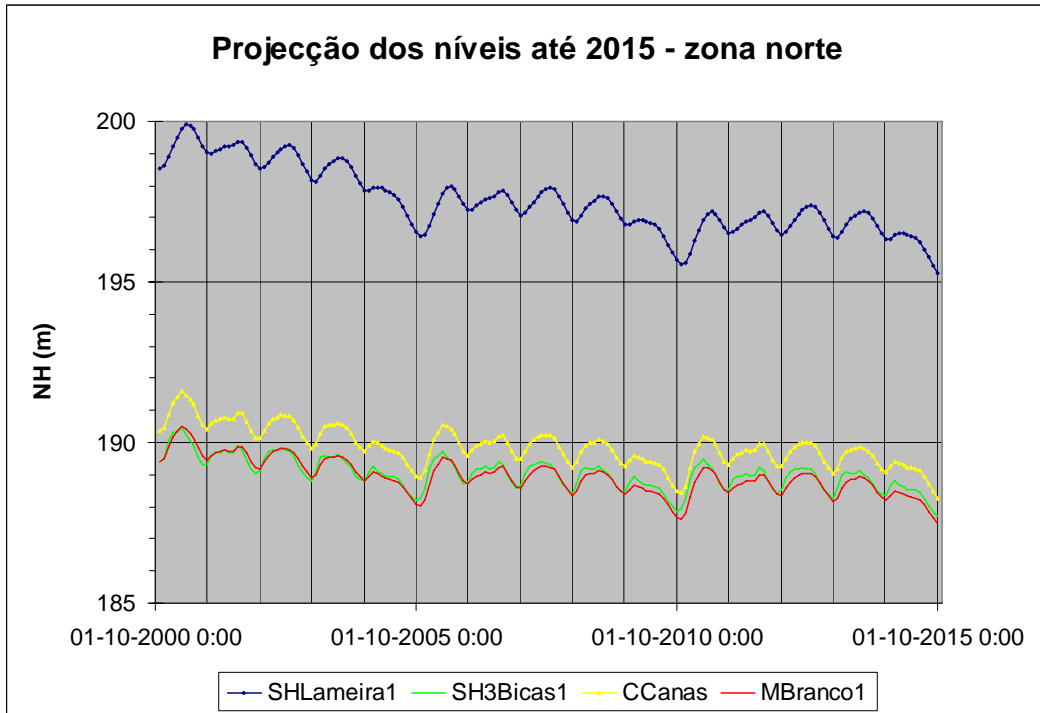


Figura 13.25 - Níveis simulados até 2015, nos piezómetros da zona norte do aquífero.

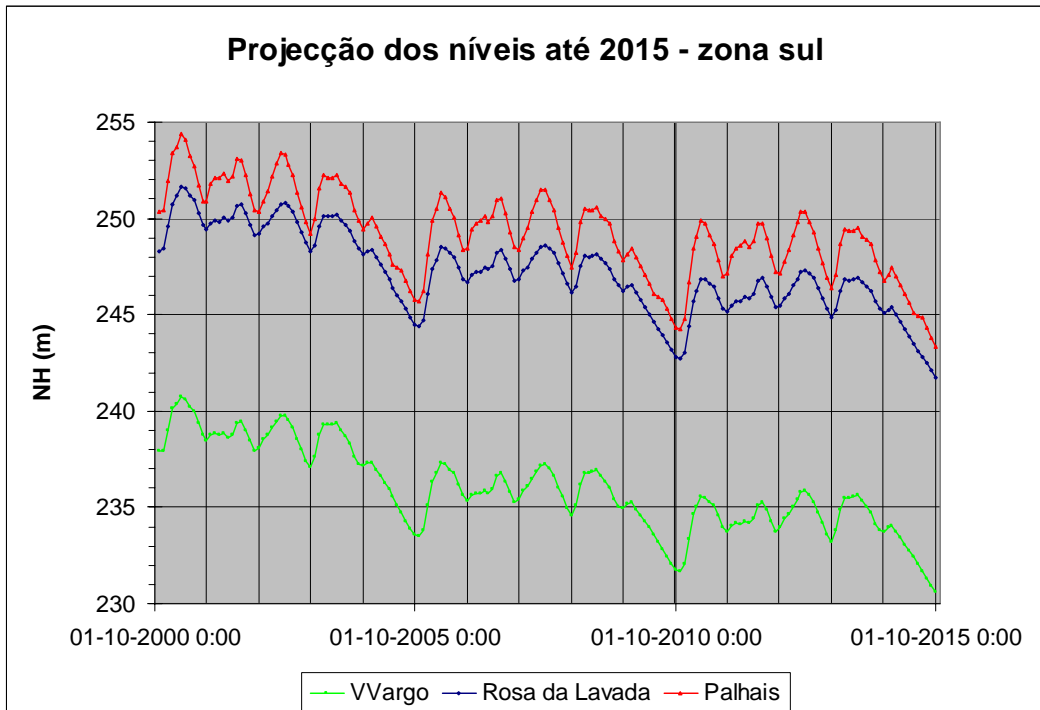


Figura 13.26 - Níveis simulados até 2015, nos piezómetros da zona sul do aquífero.

No sentido de avaliar a dimensão da projectada diminuição de níveis, foram comparados os níveis simulados durante o período de Outubro de 2000 até ao final de Setembro de 2005, com os níveis simulados para os dois quinquénios seguintes. Note-se que se admitiu que as condições de recarga se repetiram durante estes períodos. É o que se representa na Figura 13.27, de cuja observação se pode concluir o seguinte:

- a) Os rebaixamentos agravam-se no segundo quinquénio da projecção;
- b) Os rebaixamentos serão particularmente significativos nas zonas de Vale de Vargo, onde se prevêem rebaixamentos da ordem de 3 a 6 m, o que poderá afectar a produtividade de alguns furos de abastecimento público da Câmara Municipal de Serpa (furos da Herdade das Cortes);
- c) Na zona do castelo de Moura, segundo este modelo, os rebaixamentos ficarão situados entre cerca de meio metro e um metro e meio, o que poderá afectar o artesianismo repuxante da zona, induzindo, eventualmente problemas de contaminação sobre o recurso hidromineral de *Santa Comba e Três Bicas*;
- d) O abastecimento público a Moura, a partir de Fonte da Telha (numa zona próxima de Cerro das Canas), apenas não será afectado por terem sido construídas novas origens mais profundas. As captações antigas, com rebaixamentos de quase dois metros deixariam de funcionar nas mesmas condições;

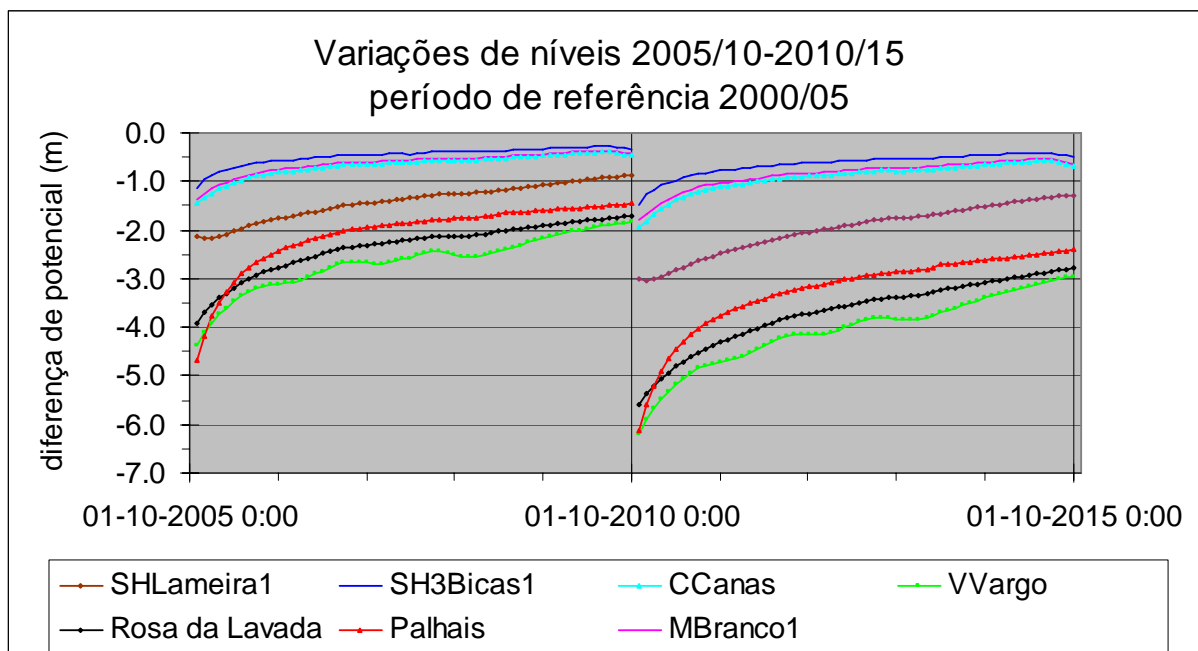


Figura 13.27 - Diferenças de níveis piezométricos em relação ao período 2000/05, segundo o modelo MF0015.

e) Na serra de Ficalho prevêem-se rebaixamentos da ordem de 2,5 a 6 metros, o que irá afectar o abastecimento público a Vila Verde de Ficalho, exigindo um reforço da água captada no chamado "furo da serra", em substituição do poço antigo. São desconhecidas as características específicas deste furo para se avaliar o seu comportamento perante a situação prevista.

A análise anteriormente apresentada não se pode estender à zona de *Gargalão* por não existirem dados piezométricos desta área, contudo as características do furo mais antigo deste local tornam esta origem bastante vulnerável. Já se registaram quebras de produtividade no referido furo nos verões de 2005 e de 2006. Simultaneamente também se verificou que a nascente do Gargalão, no leito da Ribeira de S. Pedro, chegou a deixar de correr nessas ocasiões.

Todas as descargas naturais do aquífero vão ver os seus caudais reduzidos. No gráfico da Figura 13.28 representa-se a evolução da quantidade de água descarregada através do conjunto das células do tipo dreno até 2015. Os dados relativos a três das principais nascentes, representa-se no gráfico da Figura 13.29.

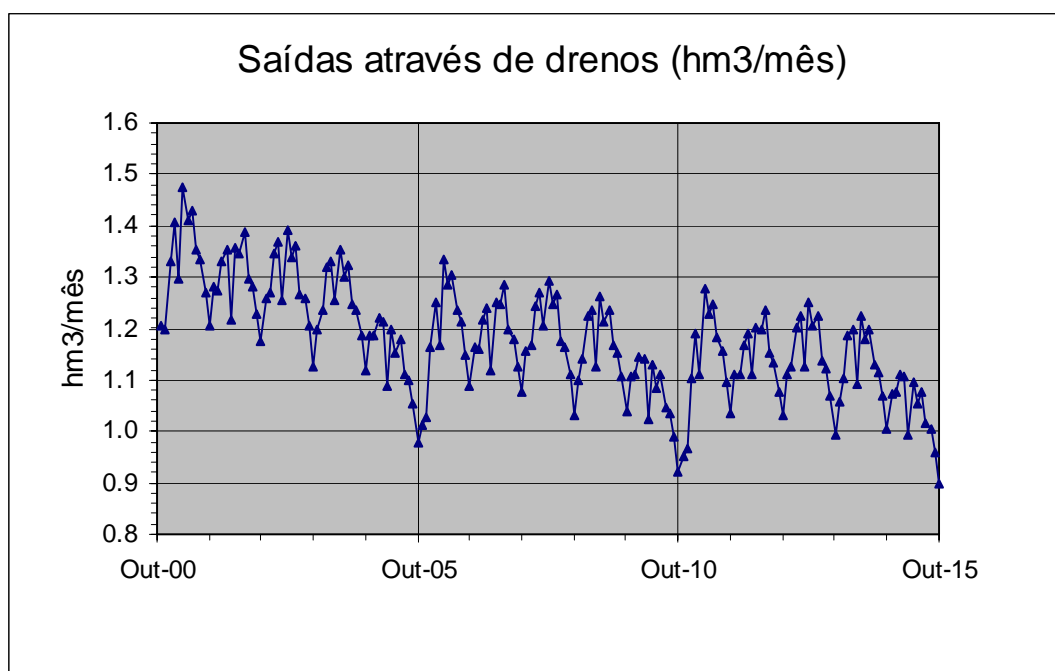


Figura 13.28 - Evolução das descargas naturais (nascentes + descargas ocultas) do aquífero Moura-Ficalho.

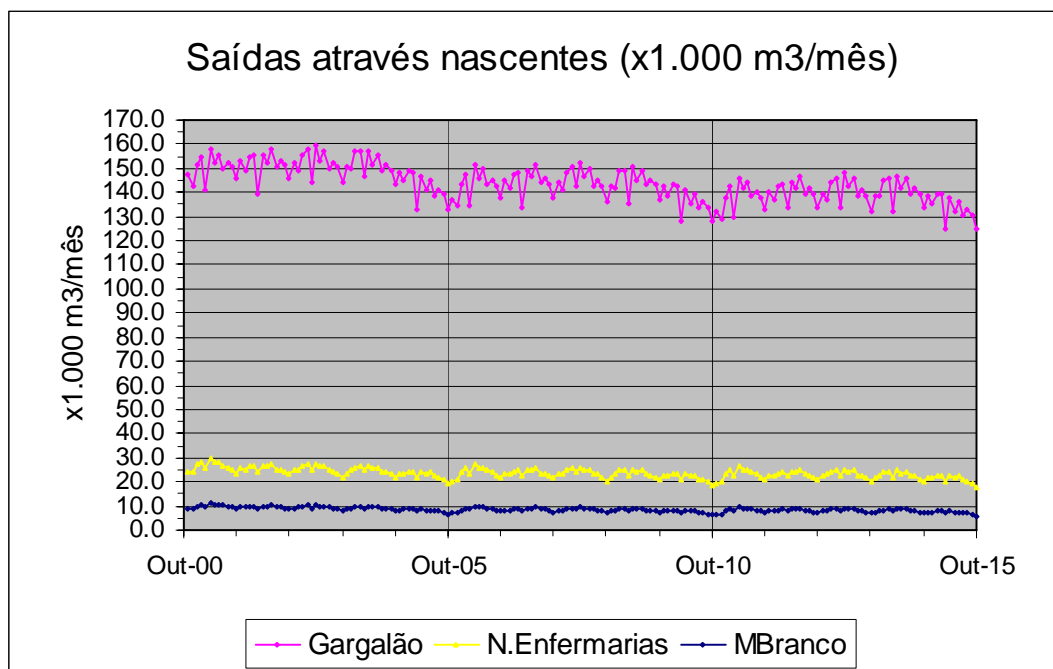


Figura 13.29 - Evolução das descargas através das três principais nascentes do aquífero Moura-Ficalho.

Note-se que não foi possível fazer a monitorização dos caudais das nascentes ao longo do tempo, como foi anteriormente referido. Contudo observaram-se situações de algumas nascentes que deixaram temporariamente de correr e esse fenómeno não foi possível reproduzir com o modelo regional desenvolvido. Apesar desta limitação o modelo indica uma redução significativa dos caudais das nascentes.

É claro que a redução dos caudais do conjunto das descargas naturais do sistema irá, na situação real, dar-se à custa de reduções nos caudais das várias nascentes e descargas ocultas mas não é possível fazer previsões em relação a cada uma. O processo irá desenvolver-se no sentido de redução das descargas naturais do sistema até se atingir um novo equilíbrio. Apenas se poderá pensar que as nascentes serão provavelmente mais afectadas porque as respectivas cotas serão previsivelmente superiores às das descargas ocultas.

13.5 Medidas contra a sobreexploração

A situação actual do aquífero Moura-Ficalho já exige intervenções contra a degradação quantitativa detectada. Não foram simulados cenários relativos a diminuições da recarga do aquífero resultantes das alterações climáticas uma vez que, como foi referido no capítulo 7, os vários modelos de previsão do clima considerados, embora permitam antever uma diminuição da infiltração eficaz, não permitem quantificar essa diminuição de forma coerente entre as previsões. Além disso, se fossem considerados cenários de redução da recarga devido às alterações climáticas, os resultados da

simulação apresentar-se-iam ainda mais graves, mas o problema é essencialmente do mesmo tipo, pelo que as soluções simuladas para a situação de sobreexploração também contribuirão para minimizar esses efeitos.

Numa situação de sobreexploração como a que foi detectada, podem tomar-se dois grandes tipos de medidas:

- Impor restrições nas extracções, de forma a reduzir o volume total de água captado do aquífero;
- Aumentar a recarga do aquífero, de forma a incrementar as disponibilidades.

Atendendo à legislação vigente relativa aos títulos de utilização do domínio hídrico (Decreto Lei n.º 226a/2007 de 31 de Maio e regulamentação complementar) é possível a revisão destes títulos de utilização, no sentido de impor restrições aos volumes captados. Foram simuladas várias intervenções deste tipo mas, atendendo aos custos económicos e sociais que este tipo de medidas envolve, também foram simuladas intervenções que visam incrementar as disponibilidades hídricas. O que se referiu anteriormente não invalida todas as medidas a implementar no sentido de reduzir as perdas nas redes de adução e distribuição (renovação de redes em curso no concelho de Moura) e de redução de consumos, através de campanhas de sensibilização da população, da reutilização de águas, etc.. Pelo contrário, pretende-se reforçar a importância complementar dessas medidas, num quadro de racionalização da utilização conjunta dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

13.5.1 Restrições na captação

Do conjunto de simulações feitas com reduções nos caudais captados, pode concluir-se que para reequilibrar as entradas e saídas do aquífero as medidas que se passam a descrever seriam ainda ligeiramente insuficientes (Figura 13.30):

- a) Os furos destinados à agricultura ficam limitados a um volume máximo diário de 150 m³;
- b) Os furos destinados ao abastecimento público teriam que reduzir os respectivos volumes captados em 50%.

Apesar destas restrições, aliás de muito difícil senão impossível implementação, segundo o modelo, ainda se verifica um pequeno défice no balanço de entradas e saídas do aquífero Moura-Ficalho. No final do ano hidrológico 2004/05 seria apenas um valor residual de -0,49 hm³, mas no final de Setembro de 2015 o défice ascende já a 2,28 hm³.

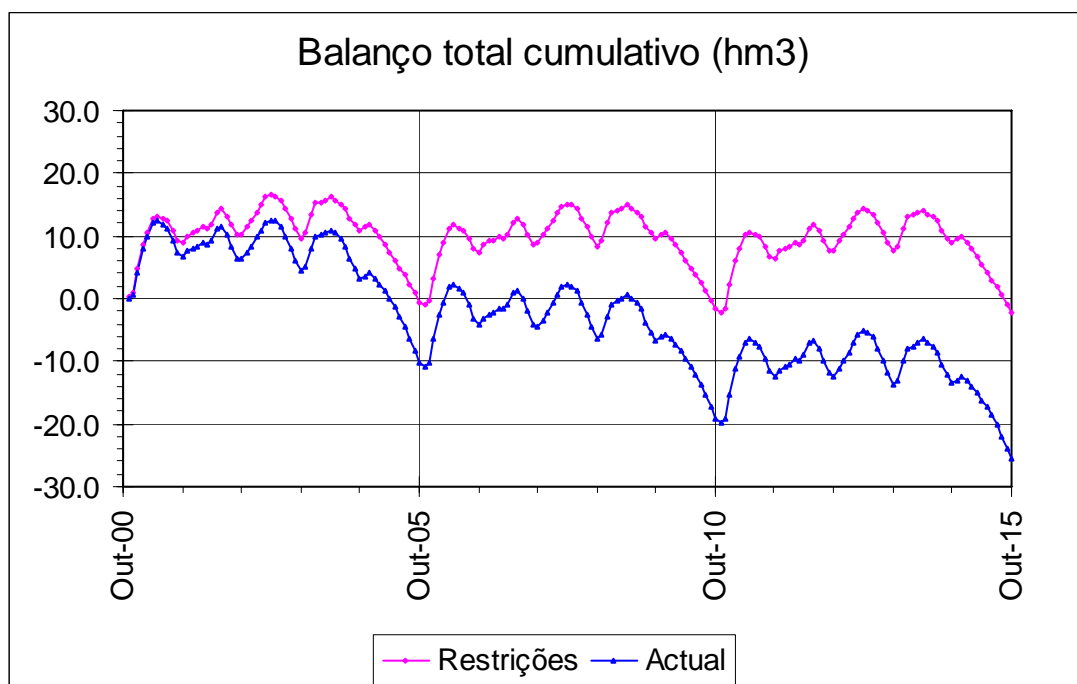


Figura 13.30 - Balanço total cumulativo considerando as restrições na exploração do aquífero.

Passa-se a uma breve análise de soluções mais realistas, relacionadas com o aumento da recarga do aquífero.

13.5.2 Intensificação da recarga natural

A recarga natural do aquífero Moura-Ficalho, como foi referido, faz-se, não só por infiltração difusa a partir de materiais de cobertura, mas também pela infiltração de águas pluviais através de estruturas cársticas do tipo algar, as quais funcionam como sumidouros (recarga concentrada). Contudo, estes algares encontram-se parcialmente obstruídos pelo arrastamento de material detrítico. O grau de colmatção das estruturas cársticas situadas na bacia hidrográfica da Ribeira de Brenhas, é de tal modo acentuado que se assiste, com alguma frequência, a fenómenos de inundação, particularmente sentidos na zona urbana de Moura.

A intensificação da recarga natural, pode alcançar-se mediante a construção de uma infra-estrutura de recarga, constituída por um conjunto de furos de recarga, susceptíveis de se manterem em funcionamento durante vários anos, mediante um programa anual de manutenção e limpeza.

As infra-estruturas de recarga a criar serão furos com características particulares, como se evidencia no corte esquemático da Figura 13.31. Trata-se de furos que, em princípio não terão que ser entubados, sendo preenchidos com calhaus bem rolados e calibrados de forma a assegurar uma elevada porosidade e condutividade hidráulica. Pretende-se simular os algares semi-

obstruídos responsáveis pela recarga natural, com a vantagem de serem equipados com um dispositivo de limpeza por injeção de ar. Este dispositivo será constituído por um conjunto de colunas de aço dimensionadas para cada local, de forma a serem eliminados os materiais finos acumulados durante o Inverno, através de uma operação de limpeza com compressor. Simultaneamente, as mesmas colunas de aço servirão como protecção para um sensor de níveis, com sistema electrónico de aquisição de dados, que ficará suspenso no seu interior, fornecendo dados importantes para o acompanhamento e avaliação da eficiência do sistema.

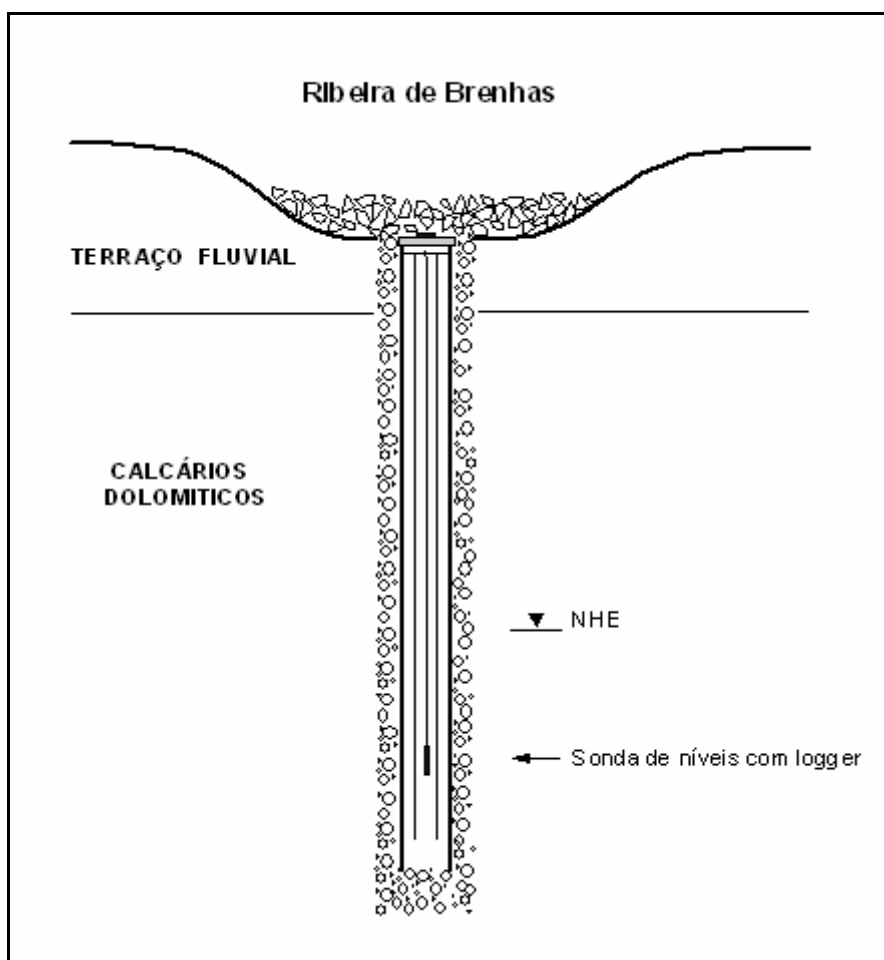


Figura 13.31 - Perfil esquemático de um furo de recarga.

A localização destes furos, o seu número e as características particulares de cada um terão que ser precedidas de estudos de pormenor, sobretudo de topografia, geofísica e sondagens mecânicas. Haverá ainda que fazer ensaios de aquífero nos vários locais de forma a caracterizar cada situação do ponto de vista hidráulico. Entre outros factores a considerar, haverá que localizar os furos de

recarga em áreas em que não exista agricultura intensiva, garantido desta forma que esta medida também vá contribuir para melhorar a qualidade da água do aquífero Moura-Ficalho, em particular no que respeita aos nitratos.

No sentido de fazer uma avaliação preliminar da eficiência de um sistema de intensificação da recarga natural, foram considerados quatro furos deste tipo (*R1* a *R4*), implantados ao longo da Ribeira de Brenhas, como se mostra na Figura 13.32. Nesta mesma figura representam-se as sub-bacias afectas a cada um destes furos das quais se obtiveram as áreas apresentadas na Tabela 13.6. Estas áreas foram consideradas no cálculo dos totais mensais de água caída em cada sub-bacia, sendo estes valores utilizados no cálculo dos totais infiltrados em cada furo. Atendendo ao carácter provisório destas localizações, não se justifica a utilização de técnicas mais sofisticadas, sendo o cálculo dos valores de recarga feito mediante a aplicação de taxas.

Foram consideradas taxas de infiltração crescentes até se atingirem os 25% do total de água caída em cada sub-bacia. Nesta situação verificou-se que o aquífero já, não só repunha a situação inicial como a ultrapassava com um excesso de armazenamento da ordem de 3,25 hm³, no final do período de simulação.

Considerando os furos de recarga com uma taxa de 20%, o défice final, em Outubro de 2015, seria -2,51 hm³.

Considerando os furos de recarga com uma taxa de 22%, o défice final, em Outubro de 2015, teria um valor residual de -0,20 hm³, o que se pode considerar praticamente reequilibrado (com a taxa de 23% já se chega a um excesso de +0,95 hm³).

Das várias simulações realizadas, representam-se na Figura 13.33 os balanços cumulativos das simulações do modelo *MF0015*, considerando as taxas de recarga de 0%, 20% e 25% (*R0*, *R20* e *R25*, respectivamente).

Tabela 13.6 - Áreas das sub-bacias de influência dos furos de recarga (*R1* a *R4*).

	R1	R2	R3	R4
Áreas(m ²)	6986866	9201642	5765402	6349606

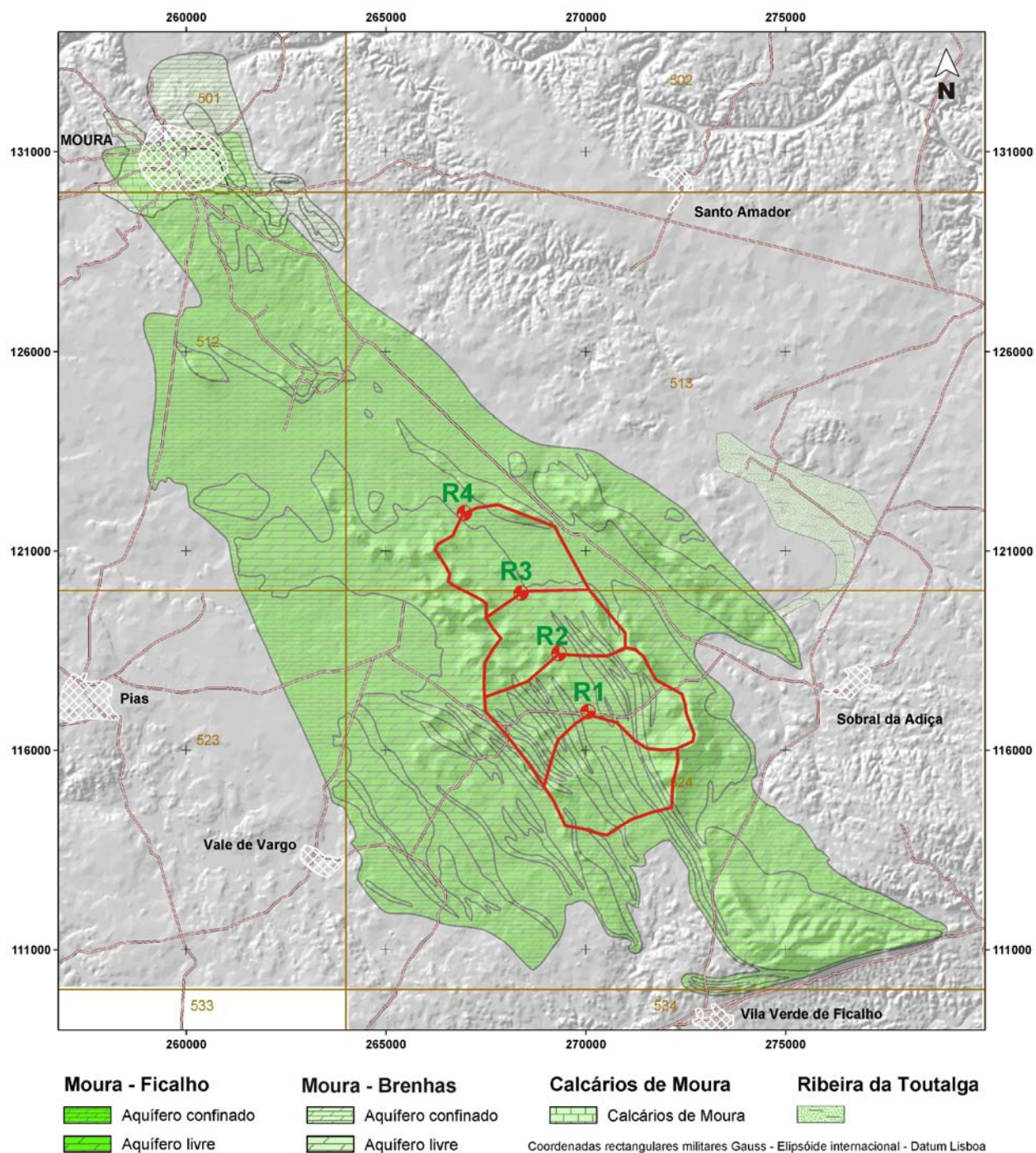


Figura 13.32 - Localização dos furos de recarga (R1 a R4) e respectivas sub-bacias de influência.

O volume total de água infiltrada necessário para se reequilibrar o aquífero é 44,42 hm³ no final de Setembro de 2015, o que corresponde a um volume médio de incremento de recarga de 2,96 hm³/ano.

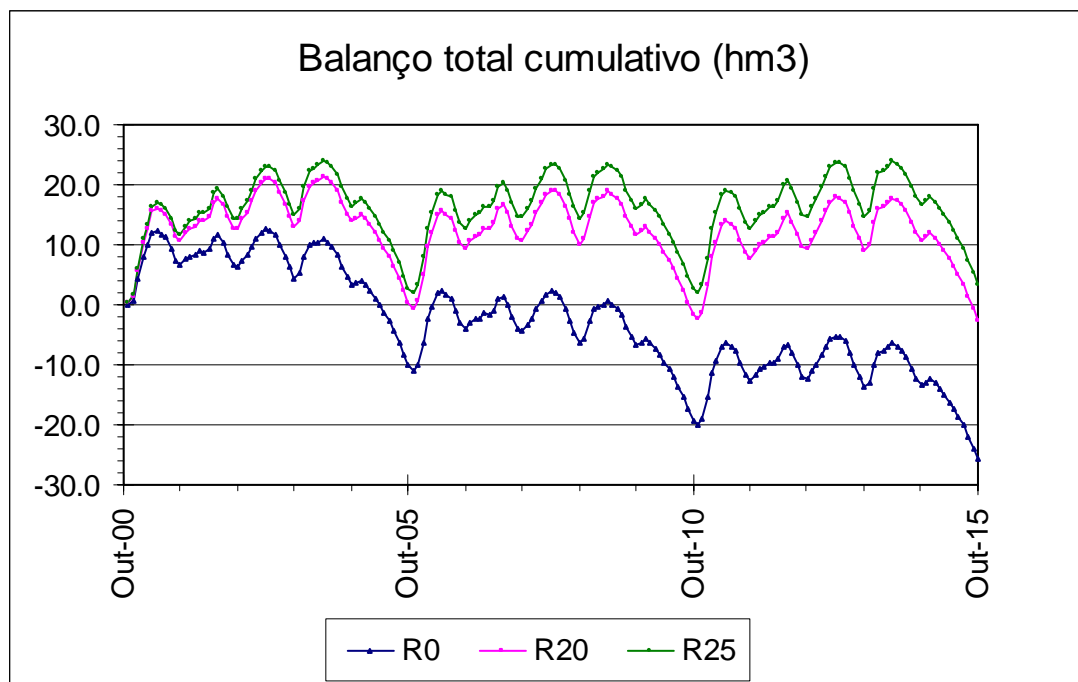


Figura 13.33 - Balanço total cumulativo considerando caudais dos furos de recarga de 0%, 20% e 25% da água total caída nas bacias de influência dos furos de recarga.

Deve notar-se que a localização dos furos de recarga incidiu propositadamente sobre a bacia da Ribeira de Brenhas, já que desta forma também se conseguirá alguma regularização do escoamento deste curso de água que, como foi referido anteriormente, tenderá a apresentar maiores riscos de cheias, com as alterações climáticas previstas para a região.

13.5.3 Recarga artificial

Pensou-se num outro cenário para fazer face à situação detectada, que consistiria na utilização de água do empreendimento de fins múltiplos de Alqueva na recarga artificial do aquífero.

Não existindo ainda um projecto da rede de adução de água para o perímetro de rega de Machados, considerou-se a zona abrangida por este perímetro de rega e tentou-se localizar os furos de recarga (designados RA1 a RA4), próximos do respectivo limite sul, como se assinala na Figura 13.34.

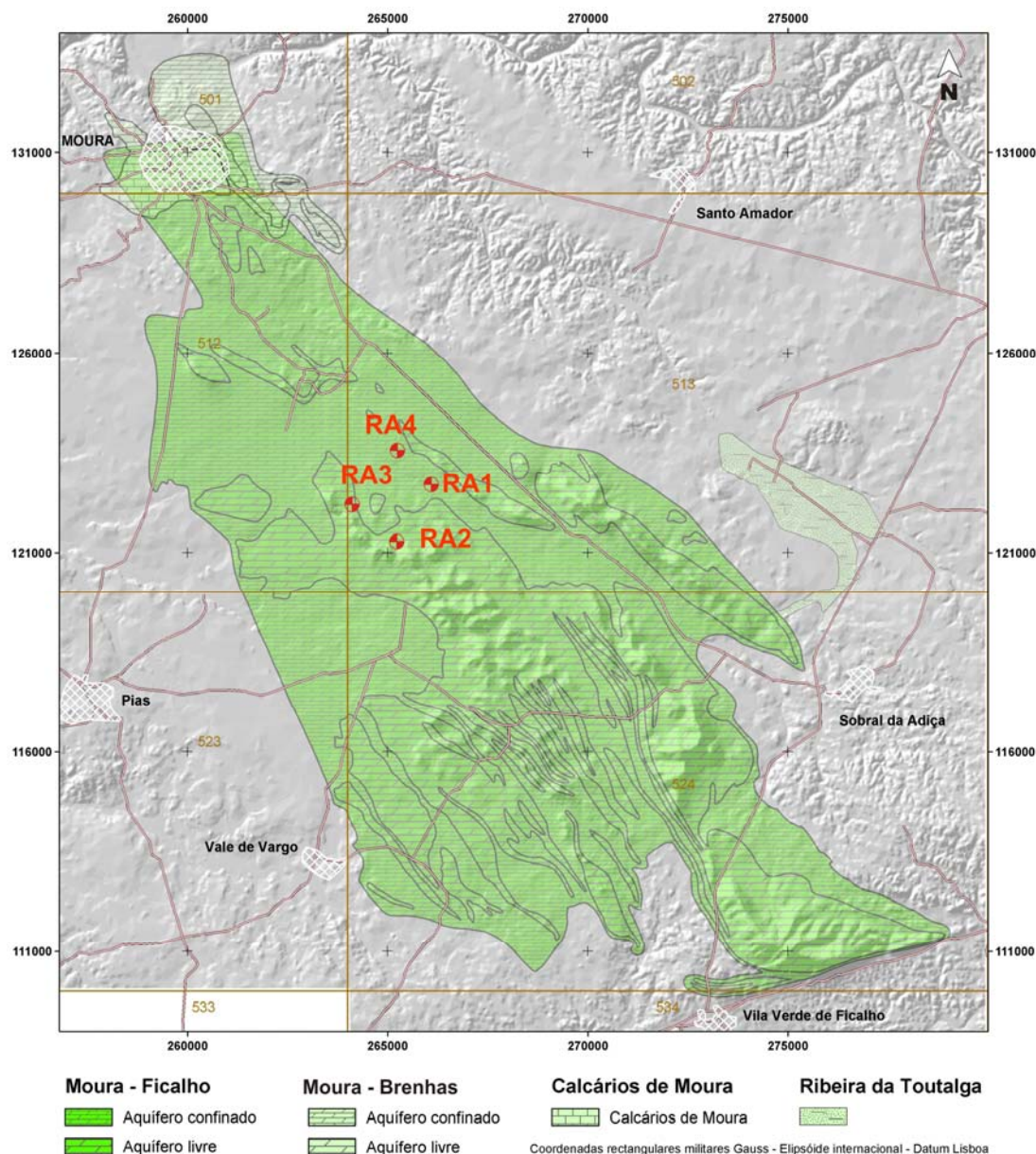


Figura 13.34 - Localização dos furos de recarga artificial (RA1 a RA4), localizados próximo do limite sul do futuro perímetro de rega de Machados (segundo informação da EDIA).

É claro que uma vez conhecida a configuração dessa rede de adução de água, haverá que localizar o conjunto dos furos de recarga em conformidade.

Considerando a localização apresentada e caudais de injeção de 4.000 m³/dia no período de Novembro a Abril, em cada furo, os resultados da simulação permitem concluir que os 54.510.000 m³ injectados, a que correspondem cerca de 3,63 hm³/ano, foram insuficientes para reequilibrar o aquífero. O desequilíbrio no final de Setembro de 2015 será de -9.619.280 m³.

No sentido de avaliar a influência da localização dos furos de recarga, foi ainda simulada uma nova localização dos furos RA1 a RA4, como se apresenta na Figura 13.35.

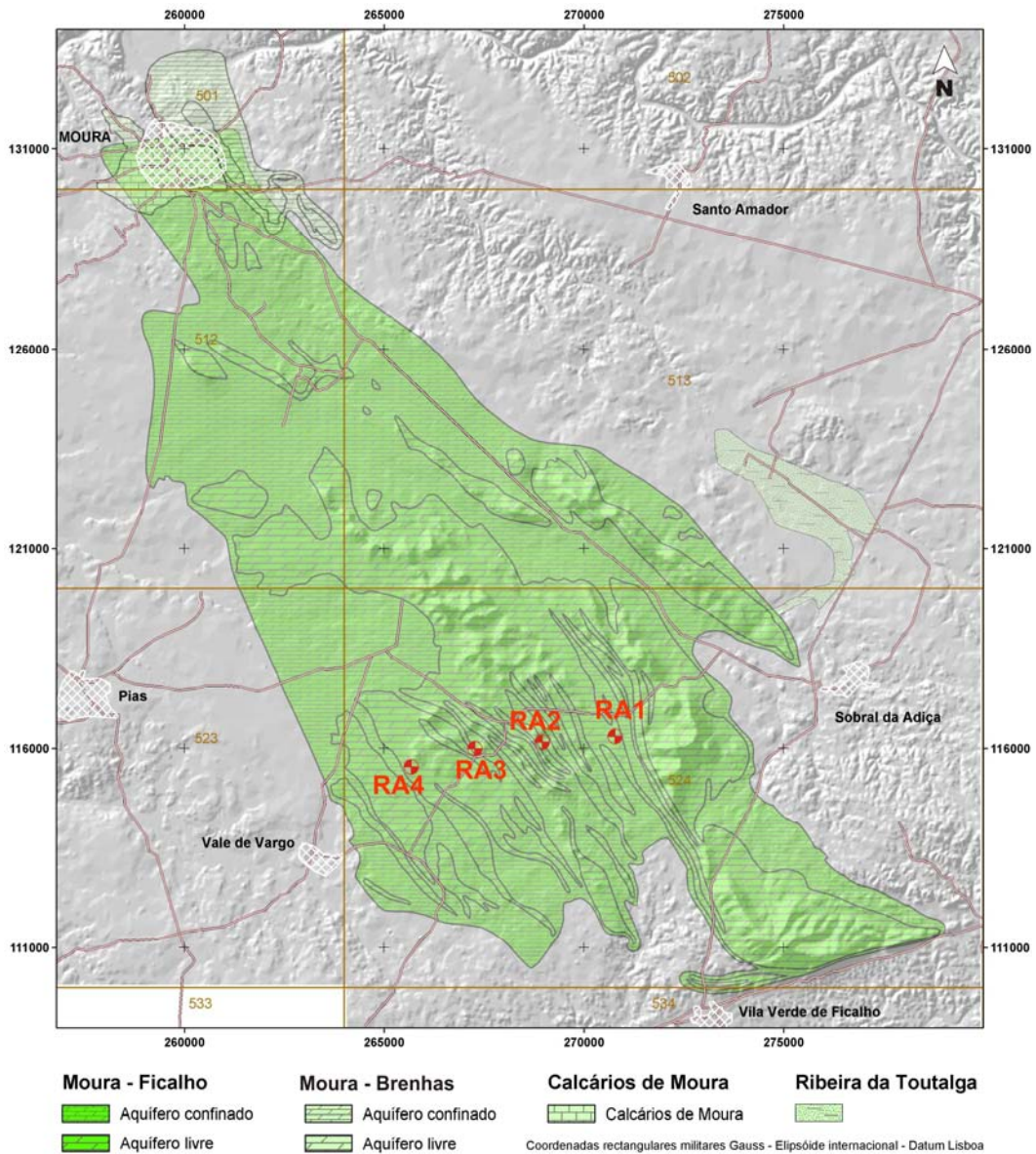


Figura 13.35 - Localização dos furos de recarga artificial (RA1 a RA4), em zonas mais afastadas do perímetro de rega de Machados.

Nesta nova localização, a mesma quantidade de água injectada iria, não só reequilibrar o aquífero, mas produzir um acréscimo no armazenamento de $+14.145.568 \text{ m}^3$. Quer isto dizer que o aquífero poderia ser reequilibrado com muito menos água injectada.

Concluiu-se, com base nas projecções feitas que é extremamente importante uma selecção criteriosa da localização dos furos de recarga, de modo a rentabilizar a quantidade de água

injectada. É claro que, também neste caso, a localização e o dimensionamento concreto de cada um destes furos, bem como o seu número, dependem de trabalhos detalhados de prospecção geofísica e mecânica a realizar.

13.6 Discussão de resultados e conclusões

O modelo regional de simulação de fluxo desenvolvido, apesar de não simular rigorosamente as situações extremas, quer de níveis quer de caudais de nascentes, permite:

- a) Confirmar o modelo conceptual desenvolvido para o Sistema Aquífero Moura-Ficalho, quantificando vários dos aspectos envolvidos;
- b) Detectar uma situação de sobreexploração;
- c) Caracterizar quantitativamente essa situação de sobreexploração;
- d) Projectar diferentes cenários para o futuro;
- e) Avaliar os benefícios de várias intervenções possíveis sobre o aquífero, como restrições nas extracções, intensificação da recarga natural e recarga artificial a partir de Alqueva;
- f) Fazer novas projecções, com base em previsões de evolução climática local e de evolução de consumos, quer aumentos quer reduções;
- g) Fundamentar quantitativamente medidas de gestão integrada da água, superficial e subterrânea.

Com trabalhos futuros de modelação de transporte de massa, utilizando o actual modelo de simulação de fluxo, será possível fazer a avaliação quantitativa de impactos de alterações nos usos do solo na qualidade dos recursos hídricos subterrâneos da região, quer se trate da implantação de uma unidade fabril, de uma estrada, de um perímetro de rega, etc..

As projecções apresentadas permitem concluir que as restrições nas extracções são medidas pouco eficientes no que respeita ao reequilíbrio do aquífero. São claramente mais eficazes as intervenções no sentido de aumentar a recarga, em particular as que se baseiam na intensificação da recarga natural.

Face às disponibilidades hídricas da região e às previsões resultantes das alterações climáticas e numa perspectiva de utilização e gestão integradas dos recursos hídricos, considera-se que:

- a) Importa que, sempre que seja possível a escolha, seja privilegiada a utilização da água de Alqueva em relação à água subterrânea, no que respeita aos regadios já existentes;
- b) Os Estudos de Impacte Ambiental de novos regadios a implementar, com base em água de Alqueva, deverão avaliar eventuais impactes na qualidade da água do Aquífero Moura-Ficalho e, caso se detectem impactes negativos significativos na qualidade desta, além das medidas de mitigação dos mesmos, deverão propor medidas de compensação, de forma a não agravar o problema de excesso de nitratos que já foi detectado neste aquífero;

- d) O licenciamento de novas captações de água subterrânea do aquífero Moura-Ficalho deverá ser criteriosamente analisado, considerando o abastecimento para consumo humano como primeira prioridade. Para regadio não se devem conceder mais licenças. Para o abeberamento de gado, pelas quantidades reduzidas que envolve, poderão conceder-se novas licenças.
- e) Adoptar as medidas necessárias à implementação da intensificação da recarga natural e de recarga artificial a partir de Alqueva, com o respectivo programa de monitorização e controlo.

ÍNDICE DO CAPÍTULO 13

13	MODELO REGIONAL Do aquífero moura-ficalho	159
13.1	Dados de base	159
13.1.1	Recarga	159
13.1.2	Níveis piezométricos	163
13.1.3	Nascentes e descargas ocultas	165
13.1.4	Furos de captação	166
13.2	Evolução do Modelo Moura-Ficalho e discretização espacial	172
13.2.1	Modelo dobrado	172
13.2.2	Modelo simples	177
13.3	Modelo MF38	181
13.3.1	Calibração e resultados obtidos	181
13.3.2	Balanço hídrico	186
13.4	Projecção da simulação do aquífero até 2015	188
13.5	Medidas contra a sobreexploração	192
13.5.1	Restrições na captação	193
13.5.2	Intensificação da recarga natural	194
13.5.3	Recarga artificial	198
13.6	Discussão de resultados e conclusões	201

Figuras:

Figura 13.1 -	Áreas de influência das estações udométricas e divisão dos polígonos de recarga.	161
Figura 13.2 –	Piezómetro <i>SDTrêsBicas</i> (vistas exterior e interior).	164
Figura 13.3 –	Manutenção no piezómetro Rosa da Lavada (RL).	164
Figura 13.4 –	Localização de nascentes e descargas ocultas.	167
Figura 13.5 –	Evolução dos caudais (m ³ /dia) captados nas origens Fonte da Telha e Gargalão	168
Figura 13.6 –	Evolução de caudal (m ³ /dia) de furos tipo Herdade dos Machados e furo de rega de olival.	169
Figura 13.7 –	Caudais (m ³ /dia) dos tipos <i>furo de abastecimento agrícola e rega</i> e <i>furo horta</i> .	170
Figura 13.8 –	Localização dos furos, classificados pelos respectivos caudais médios durante todo o período de simulação.	171
Figura 13.9 -	Sólidos gerados no ambiente <i>GMS</i> , utilizando <i>tíns</i> criadas em <i>ArcView</i> .	173
Figura 13.10 –	Sólidos gerados em ambiente <i>ArcGis</i> com base em sondagens virtuais.	173
Figura 13.11 -	Malha de células utilizada no modelo dobrado.	174

Figura 13.12 – Representação dos quatro domínios, P1 a P4, em que foram subdivididas cada uma das camadas 1 e 2.	175
Figura 13.13 - Malha de células da camada 1 do modelo dobrado.	177
Figura 13.14 – Malha de células das camadas 1 (verde) e 2 (azul) do modelo simples.	178
Figura 13.15 – Distribuição espacial dos “pilot points” utilizados na optimização da condutividade hidráulica das camadas 1 e 2.	179
Figura 13.16 - Evolução de níveis, com indicação dos valores observados (_obs) e simulados pelos modelos dobrado (_d) e simples (_s).	180
Figura 13.17 – Erros médios de simulação do modelo <i>MF38</i>	181
Figura 13.18 – Níveis piezométricos simulados, pelos modelos <i>MF38</i> e simples (_s) e observados.	182
Figura 13.19 – Mapa de transmissividade da camada 1 (modelo <i>MF38</i>).	184
Figura 13.20 – Mapa de transmissividade da camada 2 (<i>MF38</i>).	184
Figura 13.21 – Capacidade de armazenamento do aquífero Moura-Ficalho, por camadas e por polígonos, segundo o modelo <i>MF38</i>	185
Figura 13.22 – Caudais envolvidos no modelo <i>MF38</i> , ao longo de toda a simulação.	186
Figura 13.23 - Balanço entre os caudais médios mensais de recarga e de água saída por células do tipo furo e células do tipo dreno.	187
Figura 13.24 - Balanço cumulativo entre os volumes de água entrada e saída.	187
Figura 13.25 - Níveis simulados até 2015, nos piezómetros da zona norte do aquífero.	189
Figura 13.26 - Níveis simulados até 2015, nos piezómetros da zona sul do aquífero.	189
Figura 13.27 - Diferenças de níveis piezométricos em relação ao período 2000/05, segundo o modelo <i>MF0015</i>	190
Figura 13.28 - Evolução das descargas naturais (nascentes + descargas ocultas) do aquífero Moura-Ficalho.	191
Figura 13.29 - Evolução das descargas através das três principais nascentes do aquífero Moura-Ficalho.	192
Figura 13.30 - Balanço total cumulativo considerando as restrições na exploração do aquífero. ...	194
Figura 13.31 - Perfil esquemático de um furo de recarga.	195
Figura 13.32 - Localização dos furos de recarga (R1 a R4) e respectivas sub-bacias de influência.	197
Figura 13.33 - Balanço total cumulativo considerando caudais dos furos de recarga de 0%, 20% e 25% da água total caída nas bacias de influência dos furos de recarga.	198
Figura 13.34 - Localização dos furos de recarga artificial (RA1 a RA4), localizados próximo do limite sul do futuro perímetro de rega de Machados (segundo informação da EDIA).	199

Figura 13.35 - Localização dos furos de recarga artificial (RA1 a RA4), em zonas mais afastadas do perímetro de rega de Machados.....	200
Tabela 13.1 - Valores anuais de precipitação considerados.	160
Tabela 13.2 - Nascentes do aquífero consideradas nos modelos regionais como drenos.....	166
Tabela 13.3 - Valores de cedência específica e de armazenamento específico otimizados para os polígonos.	183
Tabela 13.4 - Volumes de água envolvidos no modelo regional.	185
Tabela 13.5 - Balanço hídrico anual do armazenamento no período de simulação.	188
Tabela 13.6 - Áreas das sub-bacias de influência dos furos de recarga (R1 a R4).....	196

14 CONCLUSÕES

A região de Moura, situada no Baixo Alentejo, é caracterizada por uma das menores precipitações médias anuais do Alentejo (550 mm/ano). Contrastando com toda a área envolvente, é conhecida tradicionalmente pela riqueza em água, o que resulta de beneficiar do facto de se situar no bordo sul Zona de Ossa Morena, numa zona para onde convergem alinhamentos de dobras anticlinais de rochas carbonatadas (calcários e dolomitos), que se desenvolvem a sudeste de Moura. Esta área de relevos orientados segundo os eixos destas dobras, apresenta um desenvolvimento cársico grande, embora parcialmente obstruído por formações de cobertura cenozóicas.

Devido a uma feliz conjugação de factores geológicos, geomorfológicos, estruturais e tectónicos, uma parte significativa da água de precipitação, que se infiltra nesta zona mais acidentada a SE, estimada em 38% da água caída, segue subterraneamente em direcção a Moura. Apenas os alinhamentos de relevo serra da Preguiça-serra Alta e serra de Ficalho não seguem este comportamento, originando descargas naturais como a nascente do Gargalão e as nascentes de Ficalho e Rosal de la Frontera, existindo barreiras hidráulicas mais ou menos bem definidas a separar estes sectores.

A origem de povoações como Moura, Sobral da Adiça e Vila Verde de Ficalho, tal como muitas outras povoações alentejanas, está certamente relacionada com a existência de nascentes nas imediações. As “termas de Moura”, que se pretendem reactivar, correspondem a um dos aproveitamentos das “Águas de Moura”, cuja utilização inicial se baseava na extracção de “sais das Águas de Moura”, concessionada por alvará de 19 de Agosto de 1893 (Silva e Acabado, 1903).

O modelo numérico do escoamento subterrâneo desenvolvido no presente trabalho, permitiu identificar outras descargas naturais do aquífero, designadas por descargas ocultas. Note-se que noutro aquífero carbonatado do Alentejo, o dos calcários de Castelo de Vide (Monteiro, 2001), também foram identificadas transferências hídricas subterrâneas entre o aquífero e outras litologias adjacentes.

Na presente situação de estudo, foram identificadas algumas dessas transferências hídricas subterrâneas como responsáveis, pelo menos por parte da recarga de outros aquíferos secundários no perímetro urbano e nas imediações de Moura, como é o caso do aquífero dos “Calcários de Moura”. As restantes zonas de descargas ocultas estão na origem de zonas de maior produtividade hídrica subterrânea, carecendo ainda de estudos mais detalhados para caracterizar esses processos. Foram ainda identificados outros aquíferos secundários (aquífero Moura-Brenhas e aquífero da Ribeira da Toutalga), que também dependem do aquífero principal no que respeita à recarga mas, nestes casos, são nascentes (respectivamente a nascente de Enfermarias e a nascente de Gargalão) que estão na origem de parte dessa recarga.

O conjunto do aquífero principal (Moura-Ficalho), dos aquíferos secundários e das formações de

maior aptidão hídrica é que constituem o designado *Sistema Aquífero Moura-Ficalho*.

A dualidade de comportamento hidráulico do aquífero Moura-Ficalho, com as redes de grandes condutas e de pequenas fracturas, foi simulada na presente tese, a uma escala regional, através de um modelo poroso equivalente de diferenças finitas (*Modflow*), em regime transitório (entre 1 de Outubro de 2000 e 31 de Dezembro de 2005), com os parâmetros hidráulicos espacialmente distribuídos e constituído por duas camadas e quatro zonas distintas. A calibração do modelo foi alcançada por iterações sucessivas, inicialmente feitas de forma manual e depois por modelação inversa. Foi utilizado fundamentalmente o software *PEST (Parameter ESTimation)* que, em particular no que respeita à camada 1 e à condutividade hidráulica, permitiu a obtenção de mapas deste parâmetro e, a partir deste, obteve-se um mapa de transmissividade, que se afigura como um instrumento útil para a gestão do aquífero. A possibilidade de considerar a variabilidade espacial do parâmetro a estimar apenas é possível na aplicação de modelação inversa *PEST*, o que constitui uma vantagem em relação a outros programas de modelação inversa.

As observações feitas a uma escala local, com base nos ensaios de aquífero realizados, foram interpretadas com base em modelos analíticos e semi-analíticos. Em determinadas situações, com algumas particularidades, os valores calculados analiticamente foram comparados com os resultados obtidos com modelos locais de diferenças finitas. Comprovou-se a utilidade e algumas limitações da *teoria das imagens* na interpretação de ensaios com efeitos de barreira. Também se constatou ser possível simular o comportamento de um furo repuxante a captar a camada 2 do aquífero Moura-Ficalho, com um modelo de diferenças finitas em regime transitório no qual o furo é simulado com uma célula do tipo dreno. A optimização foi feita, também neste caso, com o programa *PEST*, utilizando-se a técnica dos *pilot points*, no que respeita à optimização da condutividade hidráulica. Admitindo como válidos os resultados desta simulação, dada a semelhança alcançada entre os caudais observados e simulados, concluiu-se que o método de interpretação semi-analítico utilizado (método de Ferris), fez uma boa estimação do coeficiente de armazenamento mas sobreavaliou a transmissividade.

Na estimativa da recarga do aquífero Moura-Ficalho, perante a falência de métodos de balanço químico do ião cloreto, foi utilizado o modelo *EARTH (Extended model for Aquifer Recharge and soil moisture Transport through the unsaturated Hardrock)*, que é um modelo unidimensional. Neste trabalho conduzido por Chomba (2004) e continuado por Alain Francés, estimaram-se valores locais de recarga, por balanço da água no solo, sendo as taxas inicialmente encontradas nos vários piezómetros variáveis entre 38% e 47% da precipitação (Chomba, 2004). Estas primeiras estimativas foram posteriormente revistas por Alain Francés que estimou valores entre 17% e 25%. Na presente tese foi inicialmente considerada uma recarga de 45 e 40% da precipitação, posteriormente substituída pela taxa de 38%. Considera-se necessário prosseguir com mais

investigação neste tema, que se afigura poder ser ainda revisto para valores inferiores.

Apesar das incertezas apontadas quanto à recarga, o modelo regional, com os parâmetros hidráulicos espacialmente distribuídos e as suas duas camadas, reproduz o comportamento hidráulico do aquífero Moura-Ficalho e, muito embora as situações extremas, quer de potenciais hidráulicos quer de caudais de nascentes, sejam atenuadas, o modelo desenvolvido constitui uma ferramenta útil no apoio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos da região, contribuindo para uma gestão integrada e racional dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais da região.

Uma das utilizações feitas dos modelos desenvolvidos diz respeito aos volumes totais de armazenamento de água nas diferentes áreas e nas duas camadas do aquífero. Assim, com as características geométricas e hidráulicas do modelo transitório calibrado, o volume total de armazenamento de água do aquífero Moura-Ficalho será da ordem de 3.900 hm^3 , identificando-se a zona da serra de Ficalho como o principal reservatório do sistema. É claro que este valor deve ser considerado apenas como uma ordem de grandezas, sobretudo atendendo às simplificações grandes que se fizeram na geometria do mesmo. Contudo, as datações de águas com técnicas isotópicas, que se afigura como mais um tema a desenvolver em trabalhos futuros, parecem concordantes com a existência de uma camada profunda com águas muito antigas (cerca de 20 mil anos), que apenas intervêm nos fluxos anuais numa percentagem muito reduzida do seu volume total.

No que respeita aos balanços de entradas e saídas, para os cinco anos hidrológicos completos abrangidos na simulação, concluiu-se que o aquífero se encontra em sobreexploração, sendo o balanço global cumulativo de entradas e saídas no final destes cinco anos, deficitário em cerca de 10 hm^3 de água. O volume global de recursos anuais será da ordem de 20 hm^3 de água.

Para melhor caracterizar a situação detectada e procurar as soluções mais eficazes, foi utilizado o modelo em projecções de 2000 até 2015, admitindo que se repetiam as condições de recarga observadas nos cinco anos iniciais. Foi considerado que se mantinham as condições de exploração do aquífero que se observavam no final do período de observação (primeiro quinquénio). Assim, prevêem-se rebaixamentos de níveis, particularmente acentuados na zona sul do aquífero e reduções nos caudais de descarga natural do aquífero. Dos resultados obtidos, destacam-se as seguintes previsões:

- a) Problemas no funcionamento de alguns furos de abastecimento próximos de Vale de Vargo (furos da Herdade das Cortes) que, com rebaixamentos de 3 a 6 metros poderão ter quebras acentuadas de produtividade;
- b) Problemas de funcionamento dos furos antigos de abastecimento a Moura (Fonte da Telha), onde se prevêem rebaixamentos de 1,5 a 3 metros. O abastecimento da cidade apenas não será afectado porque entretanto foram construídos novos furos em 2004, que captam o aquífero a maior

profundidade e podem substituir os furos antigos;

c) Problemas de qualidade do recurso hidromineral de Santa Comba e Três Bicas, que poderão resultar do rebaixamento previsto para a zona do castelo de Moura, da ordem de 0,5 a 1,5 metros, o que irá comprometer a situação de artesianismo repuxante neste sector do aquífero Moura-Ficalho, podendo eventualmente induzir problemas de contaminação, ao nível das nascentes tradicionais de Santa Comba e Três Bicas, por mistura com águas superficiais contaminadas.

d) Outros problemas resultantes das reduções dos caudais de nascentes e descargas ocultas, que se poderão traduzir na redução de recursos nos aquíferos secundários e na escassez de água em zonas habitualmente com água todo o ano, como é o caso da Ribeira de S. Pedro.

Fizeram-se projecções de cenários de restrições intensas na exploração do aquífero, que se revelaram ineficazes para fazer face à situação de sobreexploração do aquífero. Fizeram-se também projecções de vários cenários de intensificação da recarga natural e de recarga artificial a partir de Alqueva. Estas medidas revelaram-se eficazes e susceptíveis de reequilibrar o aquífero, mantendo os seus níveis actuais de exploração.

Na presente tese fazem-se ainda previsões quanto aos impactes das alterações climáticas na recarga do aquífero Moura-Ficalho, projectando-se reduções na recarga. As medidas preconizadas para anular a situação de sobreexploração detectada também contribuirão para a mitigação desses efeitos, constituindo medidas de prevenção que importará implementar com a maior brevidade possível, para o que já foi elaborado um resumo de projecto.

No sentido de contribuir para a resolução dos problemas detectados, realizaram-se alguns trabalhos de reparação e complemento da rede de monitorização do sistema aquífero Moura-Ficalho. Assim procedeu-se à substituição de dois piezómetros que haviam sido danificados acidentalmente por máquinas agrícolas (Monte Branco e Palhais) e à construção de um novo piezómetro na zona terminal da serra da Preguiça, próximo da zona particularmente sensível de Gargalão.

Com o mesmo intuito, mantém-se em funcionamento nesta zona instrumentação para a obtenção de dados de radiação solar, humidade no solo, velocidade do vento, temperatura do ar, além dos registos de níveis e de precipitação, para se continuar a investigar a recarga do aquífero Moura-Ficalho.

Índice

14 CONCLUSÕES.....	203
---------------------------	------------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, C. (1979). *CEGEVAP: Programa automático para cálculo de balanço hídrico sequencial mensal*. Faculdade de Ciências da Univ. de Lisboa, Lisboa.
- Almeida, C. (2005). *Pumptest: Programa para interpretação automática de ensaios de bombeamento*. Faculdade de Ciências da Univ. de Lisboa, Lisboa.
- Almeida, C., Mendonça, J. J. L., Jesus, M. R. e Gomes, A. J. (2000). *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*. INAG, Lisboa.
- Alves, C. (1971). *A Bacia de Marmelar; aplicação de métodos sedimentológicos ao estudo da evolução do relevo*. Finisterra, Vol. VI - 12, Lisboa, pp. 218-245.
- Andrade, A. A. S. (1974). *Sur l'âge des orthogneiss d'Alcáçovas (Alentejo) e des filons (basiques et acides) qui les recoupernt*. Mem. Not. Mus. Lab. Mineral Geol. Univ. Coimbra, n.º 78, pp. 29-36.
- Apalategui, O., Eguiluz, L. e Quesada C. (1990). *The structure of the Ossa-Morena Zone*. in *Pré-Mesozoic Geology of Iberia* edited by R.D. Dallmeyer e E. Matinez Garcia, Springer – Verlag, Berlim, pp. 280-291.
- Araújo, A. (1989). *Estrutura de uma Geotransversal no Rio Guadiana entre Moura e Mourão*. Prova de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 92 pp.
- Araújo, A. (1995). *Estrutura de uma Geotransversal entre Brinches e Mourão (Zona de Ossa Morena): Implicações na Evolução Geodinâmica da Margem Sudoeste do Terreno Autóctone Ibérico*. Tese de Doutoramento, Universidade de Évora, Évora, 200 pp.
- Araújo, A. e Ribeiro, A. (1995). *Tagential Transpressive Strain Regime in the Évora-Aracena Domain (Ossa Morena Zone)*. Buletin Geológico y Minero, Vol. 106-2, pp. 111-117.
- AWSET V3 (Potencial Evapotranspiration Program for Automatic Weather Stations Version 3.0) (1999). *Reference Manual*. Cranfield University, Silsoe.
- Beverly, C.R., Nathan, R.J., Malafant, K.W.J., Fordham, D.P. (1999). *Development of a simplified unsaturated module for providing recharge estimates to saturated groundwater models*. Hydrological Processes 13, pp. 653–675.
- Brum da Silveira, A. (1990). *Neotectónica e Sismotectónica da região Vidigueira – Moura*. Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, equivalentes a Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 314 p.

- Carvalho, A.M.G. e Alves, C. (1970). *Nota sobre os depósitos terciários de Moura*. Finisterra, Lisboa, Vol. 10, pp: 282-291.
- Carvalho, D. Goínhas, J., Oliveira, V. e Ribeiro, A. (1971). *Observações sobre a geologia do Sul de Portugal e conseqüências metalogenéticas*. Est. Not. Trabalhos, Serv. Fom. Min., t. 20, fasc.1/2, pp. 153-199.
- Carvalho, D., Correia, H. e Inverno, C. (1976). *Contribuição para o conhecimento geológico do Grupo de Ferreira-Ficalho. Suas relações com a Faixa Piritosa e Grupo do Pulo do Lobo*. Mem. Not. Mus. Lab. Min. Geol. Coimbra, nº 82, pp. 145-169
- Carvalho, J. (1987). *Estudo Petrográfico e Geoquímico de metavulcanitos da região Santo Aleixo – Amareleja (Alentejo – Portugal)*. Relatório de Estágio Científico. Dep. Geol. Fac. Ciên. Univ. Lisboa.
- Carvalhosa, A. (1965). *Contribuição para o conhecimento geológico da região entre Portel e Ficalho (Alentejo)*. Mem. Serv. Geol. Portugal, N.º 11, pp. 1-130.
- Carvalhosa, A. (1983). *Esquema geológico do Maciço de Évora*. Comun. Serv. Geol. Portugal, t. 69, fasc.2, pp. 201-208.
- Carvalhosa, A. e Carvalho, A.M.G. (1970). *Notícia explicativa da folha 43-B – Moura*. Serv. Geol. de Portugal, 30 p.
- Carvalhosa, A., Gonçalves, E. e Oliveira, V. (1987). *Notícia explicativa da folha 36-D (Redondo)*. Serviços Geológicos de Portugal, 63 p.
- Carvalhosa, A e Zbyszewski, G. (1991). *Notícia explicativa da folha 40-B (Reguengos de Monsaraz)*. Serviços Geológicos de Portugal, 51 p.
- Casimiro Mendes, J. e Bettencourt, M.L. (1980). *O Clima de Portugal - Contribuição para o Estudo do Balanço climatológico de água no solo e classificação climática de Portugal Continental*. Inst. Nacional de Meteorologia e Geofísica, fasc. XXIV, Lisboa, 287 p.
- Chacón, J., Oliveira, V., Ribeiro, A. e Oliveira, J. T. (1983). *La estructura de la Zona de Ossa-Morena*. Libro Jubilar J. M. Rios Instituto Geol. Min. da España, Madrid, t. 1, pp. 490-504.
- Chomba, A. (2004). *Recharge estimate in Moura-Ficalho Aquifer Using Earth Model*. Library of International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation in Enschede, The Netherlands, 59 p.
- Chow, V. I. (1952). *On the determination of transmissivity and storage coefficients from pumping test data*. Transactions Am. Geophysical Union, Vol. 33, pp. 397-404.
- Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J.

Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton, (2007). In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Cook, P.G., Hatton, T.J., Pidsley, D., Herczeg, A., Held, A., O'Grady, A., Eamus, D. (1998). *Water balance of a tropical woodland ecosystem, Northern Australia: a combination of micro-meteorological, soil physical and groundwater chemical approaches*. Journal of Hydrology 210, pp. 161–177.
- Costa, A.M. (1985). *Características hidrogeológicas dos principais afloramentos de rochas carbonatadas do substrato hercínico no Alentejo*. Congresso sobre o Alentejo, Assoc. Municípios de Beja, II; pp 657- 665.
- Costa, A.M. (1988). *Ensaio de um aquífero profundo próximo de Moura, utilizando uma sondagem com artesianismo repuxante*. Comun. Serv. Geol. Portugal, t. 74, pp. 29-34.
- Costa, A.M. (1991). *Sistemas aquíferos da região de Moura*. Comun Serv. Geol. de Portugal, t 77, pp. 133-146.
- Costa, A.M. (1992). *Características hidrogeológicas dos «Calcários de Moura»*. Comun Serv. Geol. de Portugal, t 78, fasc.1, Lisboa, pp. 3-11.
- Costa, A.M. (1998). *Sistema Aquífero Moura-Ficalho*, Comunicações do 4º Congresso da Água, Lisboa, pp. 171-172.
- Costa, A. M. (2001). *Sistema Aquífero Moura-Ficalho. Anexo II - Fichas dos Sistemas Aquíferos do Alentejo do Relatório Técnico do Projecto de Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo*, CCRA, Évora, 130 p.
- Costa, A. M., Dill, A. C., Müller, I. e Oliveira, V. (1998). *Monitorização dos Aquíferos da Região de Moura-Ficalho sondagens, construção e equipamento de piezómetros*. Comunicações do 4º Congresso da Água, Lisboa, pp. 181-182.
- Costa, A. M., Francés, A., Fernandes, J., Lourenço, C., Midões, C., Ribeiro, L. e Oliveira, E. (2006a). *Estudo Hidrogeoquímico do Sistema Aquífero Moura-Ficalho*. Comunicações do 8º Congresso da Água, Figueira da Foz.
- Costa, A.M., Francês, A., Lubczynski, M. W. e Ribeiro, L. (2006b). *Modelo numérico de fluxo em regime transitório: caso do aquífero Moura-Ficalho*. Comunicações do 8.º Congresso da Água, Figueira da Foz.
- Custodio, E. e Llamas, M. R. (1996). *Hidrología Subterránea*. segunda edición corregida, Ediciones Omega, Barcelona, tomo I e II, 2359 p.

- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la Ville de Dijon*. Vitor Dalmont, Paris, 674 p..
- Decreto Lei n.º 226a/2007 de 31 de Maio. *Diário da República nº 105/07 – I Série, 2º suplemento*. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Lisboa.
- Delgado, J. F. N. (1908). *Système Silurique du Portugal. Étude de stratigraphie paléontologique*. Mem. Serv. Geol. Portugal, 245 p.
- Dill A. C., Muller, I., Costa, A. M., Monteiro, J. P. (1998). *Exemplos de aplicação de métodos geofísicos electromagnéticos (VLF-EM e RMT-R) no estudo de aquíferos cársicos do Alentejo e Algarve*. ., Comunicações ao 4º Congresso da Água, FIL, 23 a 27 de Março de 1998, pp. 241, artigo In edição CD..
- Directiva 2006/118/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 12 de Dezembro de 2006. Jornal Oficial da União Europeia, L372, pp. 19-31. Bruxelas.
- Doherty, J. (2002). *PEST: Model-Independent Parameter Estimation*. User Manual (4th ed.). Watermark Numerical Computing, Brisbane, Queensland, Austrália, 249 p.
- Duque, J. (2005). *Hidrogeologia do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja*, Dissertação para obtenção do grau de doutor, FCUL, 420 pp.
- ERHSA, (2001). *Relatório final do Projecto “Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo”*. Comissão de Coordenação da Região Alentejo, Évora.
- Feio, M. (1946). *Os terraços do Guadiana a jusante do Ardila*. Com. Serv. Geol. Port., t. XXVII, Lisboa, pp. 3-84.
- Feio, M., (1951). *A evolução do relevo do Baixo Alentejo e Algarve*. Com. Serv. Geol. Portugal, t. 32, 2ª parte, Lisboa, pp. 303-504.
- Ferris, J.G., Knowles, D.B., Brown, R.H. e Stallman, R.W. (1962). *Theory of aquifer tests*. U.S. Geol. Surv., Water-Supply Paper 1536-E, Washington, 174 p.
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*. Merrill Publishing Company, New Jersey, 691 p.
- Gehrels, J.C. (1999). *Groundwater level fluctuations: Separation of natural from anthropogenic influences and determination of groundwater recharge in the Veluwe area, the Netherlands*. PhD thesis Vrije Universiteit, 269 p.
- Gieske, A. (2003). The Iterative Flux-Profile Method for Remote Sensing Applications. *International Journal of Remote Sensing* 24(16), pp. 3291-3310.
- GMS (Groundwater Modeling System), v. 5.1 (2004). *Reference Manual and Tutorials*. Brigham Young University.

- Goinhas, J.A.C. (1971). *Estudo Geológico preliminar dos jazigos de Zn/Pb da região de portel (Alentejo)*. 1.º Congresso Hispano-Luso-Amer. de Geologia Económica Aplicada. Sec. 4. DGGM, pp. 78-84.
- Hantush, M. S. (1964). *Hydraulics of wells*. Advances in Hydrosience, Vol. 1, Ven. té Chow, Academic Press, pp. 281-432
- Harbaugh, A. W. (1992). *A generalized finite-difference formulation for the U.S. Geological Survey modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey Open-File Report 91-494, 60 p.
- Harbaugh, A. W. e McDonald, M. G. (1996a). *User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey Open-File Report 96-485, 56p.
- Harbaugh, A. W. e McDonald, M. G. (1996b). *Programmer's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey Open-File Report 96-486, 220p.
- Harbaugh, A.W., Banta, E. R., Hill, M. C., e McDonald, M. G. (2000). *Modflow-2000, the U. S. Geological Survey modular ground-water model - User guide to modularization concepts and the ground-water flow process*, U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, Reston, Virginia, 121 p.
- Hill, M. C. (1992). *A computer program (MODFLOWP) for estimating parameters of a transient, three-dimensional ground-water flow model using nonlinear regression*. U.S. Geological Survey Open-File Report 91-484, 358p.
- Instituto Nacional de Estatística. (2002). *Censos 2001: XIV Recenseamento Geral da População. IV Recenseamento Geral da Habitação. Resultados definitivos : Alentejo*. INE. Lisboa.
- Instituto Nacional de Estatística. (2004). *Anuário Estatístico da Região Alentejo, 2004*. INE. Lisboa.
- Jacob, C. E. (1940). *On the flow of water in an elastic artesian aquifer*. Transactions Am. Geophysical Union, Vol. 72, parte II, pp. 574-586.
- Konikow, L. F., Goode, D. J. e Hornberger, G. Z. (1996). *A three-dimensional method-of-characteristics solute-transport model (MOC3D)*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4267, 97p.
- Kuniansky, E.L. (2005), U.S. Geological Survey Karst Interest Group proceedings, Rapid City, South Dakota, September 12-15, 2005: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5160, 296 p.

- Larocque, M., Banton, O., Ackerer, P., and Razack, M. (1999). *Determining karst transmissivities with inverse modeling and an equivalent porous media*: Ground Water, vol. 37, no. 6, pp. 897-903.
- Logan, J. (1964). *Estimating transmissibility from routine production tests of water wells*. Ground Water, 2, N.º 1, pp.35-37.
- Lubczynski, M. W., Gurwin, J. (2005). *Integration of various data sources for transient groundwater modeling with spatio-temporally variable fluxes—Sardon study case, Spain*, Journal of Hydrology, 306 (1), p.71-96.
- McDonald, M. G. e Harbaugh, A.W. (1984). *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. Modeling Techniques*. U.S. Geological Survey Open-File Report 83-875, 528 p.
- McDonald, M. G. e Harbaugh, A.W. (1988). *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. Modeling Techniques*. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations Book 6, Ch. A1, 588 p.
- Mendes, F. (1967/68). *Contribuição à l'étude géochronologique par le méthode de strontium des formations cristalines du Portugal*. Bol. Mus. Lab. Min. Geol. Fac. Ciênc. Univ. Lisboa, II, pp. 3-157.
- Mette, W. (1989). *Acritarchs from Lower Paleozoic rocks of the Western Sierra Morena (SW Spain) and biostratigraphic results*. Geologica et Paleontologica, Merburg, 53: pp. 1-19.
- Monteiro, J. P. (2001). *Characterisation of a Carbonate Aquifer for the application of a Regional Discrete Continuum Flow Model (Castelo de Vide Carbonate Aquifer - Alentejo, Portugal)*, Ph.D. Thesis. Centre de Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel. Université de Neuchâtel. pp. 143.
- Nascimento, J., Ribeiro, L., Veiga da Cunha, L, Oliveira, R. (2004). *Impacto das Alterações Climáticas nos Recursos Hídricos Subterrâneos de Portugal Continental: Alguns Resultados Preliminares*. Tecnologia da Água, nº 28- edição II, Lisboa, ed. Reed Business Information, pp. 42-51.
- Nascimento, J., Ribeiro, L., Veiga da Cunha, L, Oliveira, R. (2005). *Efeitos das alterações climáticas na disponibilidade hídrica e da qualidade da água subterrânea da região Alentejo* - in Actas do 7º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, ed. CDROM, APRH, Évora, Portugal.
- Oliveira, J. T. (1990). *Stratigraphy and Synsedimentary Tectonism*. In: R.D. Dallmeyer e E. Martinez Garcia (Editors): Pre-Mesozoic Geology of Iberia, 334-347, fig. 1-6; Berlin, Heidelberg (Springer).

- Oliveira, J. T., Oliveira, V. e Piçarra, A. (1991). *Traços gerais da evolução tectono-estratigráfica da Zona de Ossa-Morena, em Portugal: Síntese crítica do estado actual dos conhecimentos*. Com. Serv. Geol.. tomo 77. pp. 3-26. Lisboa.
- Oliveira, J. T. (Coord.), Andrade, A. S., Antunes, M. T., Araújo, A., Castro, P., Carvalho, D., Carvalhosa, A., Dias, R., Feio, m., Fonseca, O., Martins, L.T., Manuppella, G., Marques, B., Munhá, J., Oliveira, V., Pais, J., Piçarra, J. M., Ramalho, M., Rocha, R., Santos, J. F., Silva, J. B., Brum da Silveira, A., Zbyszewski, G. (1992). Carta Geológica de Portugal, escala 1:200.000, Folha 8, Serv. Geol. Port., Lisboa., 91 p.
- Oliveira, V. M. J. (1984). *Contribuição para o conhecimento geológico-mineiro da região de Alandroal-Juromenha (Alto Alentejo)*. Estudos Notas e Trabalhos do Serv. Fom. Min., t. 26, fasc. 1-4, pp. 103-126.
- Oliveira, V. M. J. e Piçarra, J. M. (1986). *Litoestratigrafia do Anticlinório Moura-Ficalho (Zona de Ossa Morena)*. Maleo, Abst., 13 p..
- Oliveira, V. M. J. e Matos, J. (1992). *Enquadramento Geológico – Mineiro da Jazida de Enfermarias (Faixa Magnético-Zincífera, Sector SW, da Zona de Ossa Morena)*. In Rábano, I. e Gutierrez-Marco, J. C. (eds.). Conferencia Internacional Paleozoico Inferior de Ibero-América. Libro de Resúmenes, Pib. Mus. Geol. de Extremadura, 1, pp. 114-115.
- Papadopoulos, I. S. and Cooper, H. H. Jr. (1967). *Drawdown in a well of large-diameter*. Water Resour. Res., 3(9), pp. 1937-1946.
- Perdigão, J., Oliveira, J. T. e Ribeiro, A. (1982). *Notícia Explicativa da Folha 44-B (Barrancos)*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 52p.
- Piçarra, J. M. e Gutierrez - Marco, J. C. (1992). *Estudo dos Graptólitos Silúricos do Flanco Oriental do Anticlinal de Moura-Ficalho (Sector de Montemor-Ficalho, Zona de Ossa Morena, Portugal)*. Comun. Serv. Geol. Portugal, t. 78, fasc. 1, pp. 23-29
- Piçarra, J. M.; Oliveira, V. e Oliveira, J. T. (1992). *Estratigrafia da Zona de Ossa Morena. Carta Geológica de Portugal à escala 1/200000, notícia explicativa da folha 8, Serv., Geol. Portugal, Lisboa, pp. 17-25.*
- Piçarra, J. M. e Sarmiento, G.. (2006). *Problemas de posicionamento estratigráfico dos Calcários Paleozóicos da Zona de Ossa Morena (Portugal)*. VII Congresso Nacional de Geologia, Resumos, vol. II, Lisboa, pp. 657-660.
- Pinto, M. S. (1985). *Escala geocronológica e granitíoides portugueses antecozóicos: uma proposta*. Mem. Not. Publ. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra, 99, pp. 157-166.

- Poeter, E. P. e Hill, M. C. (1998). *DOCUMENTATION OF UCODE: A Computer Code for Universal Inverse Modeling*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4080, 166p.
- Prickett, T. A. (1965). *Type-curve solution to aquifer test under water-table conditions*. Ground Water, Vol. 3, n.º 3, pp. 5-14.
- Priem, H.N.A., Boelrijk, N.A.I.M., Hebeda, E.H. e Schermerhorn, I.J.G. (1986). *Isotopic ages of the Alcáçovas Orthogneiss and the Beja Porphyries, South Portugal*. Comunicações Serv. Geol. Portugal, t. 72, fasc. 1/2, pp. 3-7
- Putnam, L. D. and Long, A. J. (2005). *Simulating Ground-Water Flow in the Karstic Madison Aquifer using a Porous Media Model*, Scientific Investigations Report 2005-5160, U.S. Geological Survey Karst Interest Group Proceedings, Rapid City, South Dakota, September 12-15, 2005, p. 46.
- Quental, L. (1995). *Caracterização mineralógica de concentrações ferruginosas e solos da área das minas de Vila Ruiva e Preguiça*. Relatório Interno, IGM.
- Quinn, J. J., Tomasko, D., e Kuiper, J. A. (2005). *The Role of MODFLOW in Numerical Modeling of Karst Flow Systems*. U.S. Geological Survey Karst Interest Group Proceedings, Rapid City, South Dakota, September 12-15, pp. 58-62.
- Ribeiro, A., Antunes, M. T., Ferreira, M. P., Rocha, R. B., Soares, A. F., Zbyszewski, G. Moitinho de Almeida, F. Carvalho, D. e Monteiro, J. H. (1979). *Introduction à la Géologie Générale du Portugal*. Serv. Geol. Portugal, Lisboa, 114 p.
- Ribeiro, M. L., Mata, J., Piçarra, J.M. (1992). *Vulcanismo bimodal da região de Ficalho: Características geoquímicas*. Comum. Serv. Geol. Portugal, t. 78 fasc. 2, pp. 75-85.
- Ribeiro, O. e Feio, M. (1950). *Les dépôts de type "raña" au Portugal*. C. R. Cong. Intern. Géographie, T. II, pp. 152-159.
- Ribeiro, L., Costa, A., Dill, A. C., Nunes, L. M., Pina, P., Barata, T., Grueau, C., Oliveira, E., Vieira, J., Fernandes, J., Paralta, E., Midões, C., Lourenço, C., Francés, A. (2002). *O Parque Hidrogeológico de Moura*. In Recursos Hídricos, 23 (1), APRH, Lisboa, pp. 121-133.
- Roy, J., Marques da Costa, A., Lubczynski, M. e Owuor, C. (1999). *Tests of the SGW.NMR Technique within two Aquifer Characterization Projects in the Iberian Peninsula*. Comunicação apresentada no "4 th meeting Environmental and Engineering Geophysics", Barcelona, 14 e 17 de Setembro de 1998, - In PROCEEDING, pp. 177-180.

- Santos, F. D., Forbes, K., and Moita, R. (eds.). (2002). *Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures - SIAM Project*. Gradiva, Lisbon, Portugal pp. 456.
- Scanlon, B. R., Mace, R. E., Barrett, M.E., Smith, B. (2003). *Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA*. Journal of Hydrology, 276, p.137-158.
- Silva, A. J. F. e Acabado, D.R., (1903). *As águas minero-medicinaes de Moura*. Oficinas do «Commercio do Porto», 136 p.
- Sporry, R.J., Costa, A.M., Desta, G., Roy, J. e Hugens, W.A. (1997). *A high density sampling survey of shallow karst features using EM and magnetic profiling techniques*. EEGS 3rth meeting in Denmark, in PROCEEDING, pp. 175-178
- Sepulveda, N. (2002). *Simulation of ground-water flow in the Intermediate and Floridan Aquifer Systems in Peninsular Florida*: U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 02-4009.
- Theis, C. V. (1935). *The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage*. Transactions Am. Geophysical Union, Vol. 16, pp. 519-524.
- Thiem, G. (1906). *Hydrologische methoden*. Leipzig, Gerbhardt, 56 p.
- Trescott, P. C. (1975). *Documentation of finite-difference model for simulation of three-dimensional groundwater flow*. U.S. Geological Survey Open-File Report 75-438, 30 p.
- Trescott, P. C. e Larson, S. P. (1976). *Documentation of finite-difference model for simulation of three-dimensional ground-water flow*. U.S. Geological Survey Open-File Report 76-591, 17 p.
- Trescott, P. C., Pinder, G. F.e Larson, S. P. (1976). *Finite difference model for aquifer simulation in two dimensions with results of numerical experiments*. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resource Investigation, book.7, ch. C1, 116 p.
- Van Dam, J.C., J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. van Walsum, P. Groenendijk e C.A. van Diepen. (1997). *SWAP version 2.0, Theory. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment*. Technical Document 45, DLO Winand Staring Centre, Report 71, Department Water Resources, Agricultural University, Wageningen.

- Van der Lee, J. e Gehrels, J. (1990). *Modelling Aquifer Recharge – Introduction to the Lumped Parameter Model EARTH*. Free University of Amsterdam, The Netherlands, 31 p.
- Veiga da Cunha, L, Ribeiro, L., Oliveira, R., Nascimento, J., Monteiro, J. P, Nunes, L. M., Dill, A. C. (2006). *Recursos Hídricos*, in Santos F.D. e Miranda P. (eds) *Alterações Climáticas em Portugal: Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação*, projecto SIAM II, cap.3, pp. 115-168, Gradiva, Lisboa, ISBN 989-616-081-3.
- Veiga da Cunha, L, Ribeiro, L., Oliveira, R., Nascimento, J. (2007). *Impacts of climate change on water resources: a case-study on Portugal* in: J.P. Lobo-Ferreira e J.M.P. Vieira (eds.), *Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability*, IAHS Publ. nº. 310, pp. 37-48.
- Villanueva, M. M. e Iglesias, A. L. (1984). *Pozos y acuíferos, técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. Inst. Geol. y Minero de España, Madrid 426 p.

Anexo I

Certificados de datação pelo radiocarbono e de análises de trítio



MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E ENERGIA
LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

TELEX: 12 727 NUCLAB P - TELEGRS: NUCLEARLAB, SACAVÉM - TELEF.: 2 55 0021

INSTITUTO DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA NUCLEARES
Departamento de Química
2686 Sacavém Codex

Tel.: 2550021
Telex.: 12727 NUCLAB P
Telegrs.: NUCLEALAB, SACAVÉM

CERTIFICADO DE DATAÇÃO PELO RADIOCARBONO

Amostra enviada para análise por:

Dr. Augusto Costa
Serviços Geológicos de Portugal
Serviço de Geologia Aplicada / Divisão de Hidrologia
Rua da Academia das Ciências, 19-2ª
1200 LISBOA

Resultado:

Ref. do Laboratório	Ref. da amostra	Tipo	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Idade (anos BP)	Data calibrada
ICEN - 350	SONDAGEM 11	carbonato (água)	-9,46	19160±190*	

Comentários:

* $\delta^{14}\text{C} = -905,0 \pm 2,2$ ‰
 $\text{D}^{14}\text{C} = -907,9 \pm 2,2$ ‰

Doutor J.M. Peixoto Cabral
Director do Departamento de Química

NOTAS: BP (Before Present) refere-se ao ano de 1950 (ano zero) e aplica-se às datas convencionais de radiocarbono. cal AC e cal DC referem-se a datas calibradas por dendrocronologia.
Em todas as publicações onde se mencione a idade desta amostra deverá citar-se a referência ICEN-xx iniciais de INSTITUTO DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA NUCLEARES seguidas do número dado à amostra no laboratório.
O intervalo de confiança associado à data correspondente aos erros estatísticos e de outro tipo cometidos na medição da radioactividade do Carbono-14 da amostra efectuada por este laboratório.
Esta data irá ser enviada para publicação na revista RADIOCARBON.



MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E ENERGIA
LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

TELEX: 12727 NUCLAB P — TELEGRS: NUCLEARLAB, SACAVÉM — TELEF. 9550021 — FAX: 9550117

INSTITUTO DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA NUCLEARES
Departamento de Química
2686 Sacavem Codex

CERTIFICADO DE DATAÇÃO PELO RADIOCARBONO

Amostra enviada para análise por:

Serviços Geológicos de Portugal
A/c Dr. Augusto Costa
R. da Academia das Ciências, 19-29
1200 LISBOA

Resultado:

Ref. do Laboratório	Ref. da amostra	Tipo	$\delta^{13}C$ (‰)	Idade (anos BP)	Data calibrada
ICEN - 811	Moura SDM 11	Água	-12,54	21530±370*	

Comentários:

(*) $pmc = 6,82 \pm 0,32\%$

Doutor J.M. Peixoto Cabral
Director do Departamento de Química

NOTAS: BP (Before Present) refere-se ao ano de 1950 (ano zero) e aplica-se às datas convencionais de radiocarbono. cal AC e cal DC referem-se a datas calibradas por dendrocronologia.
Em todas as publicações onde se mencione a idade desta amostra deverá citar-se a referência ICEN-xxx iniciais de INSTITUTO DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA NUCLEARES seguidas do número dado à amostra no laboratório.
O intervalo de confiança associado à data corresponde aos erros estatísticos e de outro tipo cometidos na medição da radioactividade do Carbono-14 da amostra efectuada por este Laboratório.
Esta data irá ser enviada para publicação na revista RADIOCARBON.



MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E ENERGIA
LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

TELEX: 12727 NUCLAB P - TELEGRS: NUCLEARLAB, SACAVÉM - TELEF. 9550021 - FAX: 9550117

INSTITUTO DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA NUCLEARES
Departamento de Química
2686 Sacavém Codex

CERTIFICADO DE DATAÇÃO PELO RADIOCARBONO

Amostra enviada para análise por:

Serviços Geológicos de Portugal
A/c Dr. Augusto Costa
R. da Academia das Ciências, 19-29
1200 LISBOA

Resultado:

Ref. do Laboratório	Ref. da amostra	Tipo	$\delta^{13}C$ (‰/PDB)	Idade (anos EP)	Data calibrada
ICEN - 810	Moura NB/512	Água	-14,20	1730 ± 45*	

Comentários:

(*) pmc = 80,26 ± 0,43%


Doutor J.M. Feixoto Cabral
Director do Departamento de Química

NOTAS: BP (Before Present) refere-se ao ano de 1950 (ano zero) e aplica-se às datas convencionais de radiocarbono. cal AC e cal DC referem-se a datas calibradas por dendrocronologia.
Em todas as publicações onde se mencione a idade desta amostra deverá citar-se a referência ICEN-xxx iniciais de INSTITUTO DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA NUCLEARES seguidas do número dado à amostra no laboratório.
O intervalo de confiança associado à data corresponde aos erros estatísticos e de outro tipo cometidos na medição da radioactividade do Carbono-14 da amostra efectuada por este Laboratório.
Esta data irá ser enviada para publicação na revista RADIOCARBON.



MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E ENERGIA
LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

TELEX: 12727 NUCLAB P - TELEGRS: NUCLEARLAB, SACA VÉM - TELEF. 9550021 - FAX: 9550117

INSTITUTO DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA NUCLEARES
Departamento de Química
2686 Sacavém Codex

CERTIFICADO DE ANÁLISE DE TRITIO

Amostras enviadas para análise por:

Serviços Geológicos de PORTUGAL
A/C Dr. Augusto Costa
R. da Academia das Ciências, 19 - 29
1200 LISBOA

Resultados:

Ref. de Laboratório	Ref. da amostra	data de colheita	Teor em ³ H (T.U.)
ICENT-297	MOURA SDM-11	12/09/1991	1,13 ± 0,59
ICENT-275	MOURA N8/512	12/09/1991	10,66 ± 0,64
ICENT-		/ /19	
ICENT-		/ /19	
ICENT-		/ /19	
ICENT-		/ /19	
ICENT-		/ /19	
ICENT-		/ /19	
ICENT-		/ /19	
ICENT-		/ /19	

Comentários:

Doutor J.M. Peixoto Cabral
Director do Departamento de Química

Anexo II

Séries completas de precipitação das estações udométricas de Cerro das Canas (CC), Vale de Vargo (VV) e Sobral da Adiça (SA).

Data	precipitação (mm)		
	SA	CC	VV
Set-00			
Outubro 00	40.3	32.7	45.5
Novembro 00	65.3	82.0	73.6
Dezembro 00	185.7	203.4	209.0
Janeiro 01	86.8	96.2	97.8
Fevereiro 01	86.3	119.0	97.2
Março 01	111.7	104.2	102.8
Abril 01	0.7	3.0	3.8
Mai 01	52.6	93.6	62.8
Junho 01	4.7	9.2	8.8
Julho 01	0.2	0.0	0.0
Agosto 01	0.0	0.0	0.0
Setembro 01	80.1	62.6	44.0
Outubro 01	98.3	107.6	76.6
Novembro 01	39.9	31.8	22.4
Dezembro 01	72.9	77.8	57.0
Janeiro 02	56.0	51.2	54.0
Fevereiro 02	16.4	19.2	15.6
Março 02	112.5	77.2	95.4
Abril 02	83.8	94.0	92.8
Mai 02	33.9	29.4	25.0
Junho 02	2.4	1.2	4.0
Julho 02	0.0	0.2	0.0
Agosto 02	0.2	6.0	0.0
Setembro 02	56.1	86.0	98.0
Outubro 02	73.4	109.4	57.8
Novembro 02	69.6	79.6	64.8
Dezembro 02	104.6	77.2	87.2
Janeiro 03	71.1	58.2	57.6
Fevereiro 03	99.5	66.7	79.0
Março 03	16.8	22.1	19.1
Abril 03	45.3	61.9	51.2
Mai 03	3.5	8.0	5.4
Junho 03	2.0	3.6	2.0
Julho 03	1.2	2.9	2.0
Agosto 03	0.0	0.5	0.0
Setembro 03	0.5	0.4	0.6
Outubro 03	133.5	125.2	128.8
Novembro 03	108.1	90.6	114.6
Dezembro 03	66.4	69.4	69.5
Janeiro 04	31.9	31.0	28.3
Fevereiro 04	71.2	61.0	66.9
Março 04	42.6	47.4	34.1
Abril 04	14.6	13.2	14.3
Mai 04	68.5	44.6	33.5
Junho 04	3.3	3.6	1.6
Julho 04	0.0	0.0	0.0
Agosto 04	20.6	20.6	21.8
Setembro 04	3.3	23.8	21.7
Outubro 04	93.8	128.0	89.0
Novembro 04	14.1	12.8	9.8
Dezembro 04	21.2	25.8	19.0
Janeiro 05	4.8	1.4	0.8
Fevereiro 05	14.7	14.4	2.8
Março 05	0.0	22.4	0.0
Abril 05	0.0	15.6	0.0
Mai 05	40.7	41.8	0.0
Junho 05	5.2	0.2	0.0
Julho 05	2.0	0.6	0.6
Agosto 05	0.1	1.0	0.6
Setembro 05	0.0	0.2	0.2
Outubro 05	84.3	93.0	104.4
Novembro 05	62.0	67.8	69.2
Dezembro 05	43.8	52.4	62.4

Anexo III

Séries de níveis nos piezômetros do aquífero Moura-Ficalho.

3B	
30-03-2001 0:00	191.355
01-04-2001 0:00	191.345
01-05-2001 0:00	191.145
01-06-2001 0:00	191.015
01-07-2001 0:00	190.585
01-08-2001 0:00	190.195
01-09-2001 0:00	189.985
01-10-2001 0:00	189.995
01-10-2001 0:00	189.995
01-11-2001 0:00	190.135
01-12-2001 0:00	190.065
01-04-2002 0:00	190.325
01-05-2002 0:00	190.485
01-06-2002 0:00	190.335
01-07-2002 0:00	189.955
01-08-2002 0:00	189.645
01-09-2002 0:00	189.735
01-10-2002 0:00	189.595

CCn	
01-10-2000 0:00	189.07
01-11-2000 0:00	189.09
01-12-2000 0:00	189.11
01-01-2001 0:00	189.98
01-02-2001 0:00	191.25
01-03-2001 0:00	192.47
01-04-2001 0:00	193.91
01-05-2001 0:00	193.24
01-06-2001 0:00	192.78
01-07-2001 0:00	192.29
01-08-2001 0:00	191.86
01-09-2001 0:00	191.73
01-10-2001 0:00	191.67
01-11-2001 0:00	191.71
01-12-2001 0:00	191.68
01-01-2002 0:00	191.68
01-02-2002 0:00	191.77
01-05-2002 0:00	192.32
01-06-2002 0:00	191.97
01-07-2002 0:00	191.36
01-08-2002 0:00	190.91
01-09-2002 0:00	190.95
01-10-2002 0:00	191.07
01-11-2002 0:00	191.1
06-11-2002 12:57	191.11
01-12-2002 0:00	191.31
01-01-2003 0:00	191.72
26-02-2003 12:00	192.47
13-05-2003 15:07	192.69
01-06-2003 0:00	192.23
01-07-2003 0:00	191.45
01-08-2003 0:00	191.06
20-08-2003 13:55	190.99
01-09-2003 0:00	191.11
01-10-2003 0:00	190.93
15-10-2003 12:57	191.15
01-11-2003 0:00	191.38
01-12-2003 0:00	191.43
01-01-2004 0:00	191.96
01-02-2004 0:00	192.04
18-02-2004 18:00	191.88
18-05-2004 18:57	191.77
08-09-2004 16:04	190.13
27-01-2005 12:00	190.2
09-03-2005 0:00	190.4
23-03-2005 0:00	190.27
06-04-2005 0:00	190.25
20-04-2005 0:00	190.09
04-05-2005 0:00	189.8
18-05-2005 0:00	189.75
02-06-2005 0:00	189.54
15-06-2005 0:00	189.16
29-06-2005 0:00	188.7
13-07-2005 0:00	188.24
27-07-2005 0:00	188
10-08-2005 0:00	187.97
25-08-2005 0:00	188.12
07-09-2005 0:00	188.11
21-09-2005 0:00	188.07

LA	
24-10-2000 0:00	197.35
01-11-2000 0:00	197.39
01-12-2000 0:00	197.35
01-01-2001 0:00	199.99
01-02-2001 0:00	198.93
01-03-2001 0:00	200.59
01-04-2001 0:00	202.63
01-05-2001 0:00	203.11
01-06-2001 0:00	203.29
01-07-2001 0:00	202.94
01-08-2001 0:00	202.67
01-09-2001 0:00	202.28
01-10-2001 0:00	203.39
01-10-2001 0:00	203.39
01-11-2001 0:00	202.52
01-12-2001 0:00	201.64
01-01-2002 0:00	201.38
01-02-2002 0:00	200.85
01-03-2002 0:00	201
01-04-2002 0:00	200.9
01-05-2002 0:00	201.02
01-06-2002 0:00	201.26
01-07-2002 0:00	200.83
01-08-2002 0:00	200.7
01-09-2002 0:00	200.31
01-10-2002 0:00	200.13
01-11-2002 0:00	199.93
05-11-2002 16:48	199.89
01-12-2002 0:00	199.6
01-01-2003 0:00	199.64
01-02-2003 0:00	200.01
27-02-2003 12:00	200.39
13-05-2003 12:00	201.08
01-06-2003 0:00	200.8
01-07-2003 0:00	202.45
01-08-2003 0:00	200.48
19-08-2003 19:12	200.27
01-09-2003 0:00	200.37
01-10-2003 0:00	199.99
14-10-2003 12:00	199.86
01-11-2003 0:00	199.53
01-12-2003 0:00	199.16
01-01-2004 0:00	199.25
01-02-2004 0:00	199.55
18-02-2004 12:00	199.71
01-03-2004 0:00	199.72
01-04-2004 0:00	200.07
01-05-2004 0:00	200.99
18-05-2004 12:00	200.48
01-06-2004 0:00	199.53
01-07-2004 0:00	198.38
01-08-2004 0:00	198.43
01-09-2004 0:00	198.6
01-10-2004 0:00	198.38
01-11-2004 0:00	198.17
01-12-2004 0:00	198.17
01-01-2005 0:00	197.77
27-01-2005 19:12	197.62
01-02-2005 0:00	197.57
01-03-2005 0:00	197.27
01-04-2005 0:00	196.95
01-05-2005 0:00	196.67
23-05-2005 19:12	196.39
31-05-2005 14:24	196.93
01-07-2005 0:00	196.62
01-08-2005 0:00	196.42
01-09-2005 0:00	196.13
01-10-2005 0:00	195.85

MB	
16-11-2000 0:00	189.18
01-12-2000 0:00	189.03
01-01-2001 0:00	190.19
01-02-2001 0:00	190.97
01-03-2001 0:00	192.21
01-04-2001 0:00	192.54
01-05-2001 0:00	191.7
01-06-2001 0:00	191.33
01-07-2001 0:00	191.07
01-08-2001 0:00	190.22
01-09-2001 0:00	190.48
01-10-2001 0:00	190.43
01-11-2001 0:00	189.8
01-12-2001 0:00	189.74
01-01-2002 0:00	189.83
01-02-2002 0:00	189.95
01-03-2002 0:00	189.79
01-04-2002 0:00	189.91
01-05-2002 0:00	190.73
01-06-2002 0:00	190.61
01-07-2002 0:00	190.12
01-08-2002 0:00	189.89
01-09-2002 0:00	190.01
01-10-2002 0:00	189.54
01-11-2002 0:00	189.43
06-11-2002 12:00	189.41
01-12-2002 0:00	189.42
01-01-2003 0:00	189.71
01-02-2003 0:00	190.19
13-05-2003 14:24	190.88
01-06-2003 0:00	190.68
01-07-2003 0:00	190.26
01-08-2003 0:00	190.18
20-08-2003 14:24	190.08
27-08-2003 9:36	190.06
01-09-2003 0:00	190.09
01-10-2003 0:00	190.11
15-10-2003 14:24	190.08
01-11-2003 0:00	190.08
01-12-2003 0:00	190.2
01-01-2004 0:00	190.53
01-02-2004 0:00	190.45
18-02-2004 16:48	190.43
01-03-2004 0:00	190.72
01-04-2004 0:00	190.78
21-04-2004 14:24	190.66
01-05-2004 0:00	190.57
18-05-2004 19:12	190.47
01-06-2004 0:00	190.32
01-07-2004 0:00	189.55
01-08-2004 0:00	189.71
01-09-2004 0:00	189.71
08-09-2004 14:24	189.71
01-10-2004 0:00	189.7
01-11-2004 0:00	189.85
01-12-2004 0:00	189.9
01-01-2005 0:00	189.85
27-01-2005 12:00	189.82
14-09-2005 14:45	188.578

PA		RL	
16-11-2000 0:00	243.57	01-10-2000 0:00	244.05
01-12-2000 0:00	243.33	01-11-2000 0:00	243.74
01-01-2001 0:00	245.38	01-12-2000 0:00	243.39
01-02-2001 0:00	250.95	01-01-2001 0:00	244.12
01-03-2001 0:00	254.59	01-02-2001 0:00	246.71
01-04-2001 0:00	257.14	01-03-2001 0:00	248.26
01-05-2001 0:00	255.89	01-04-2001 0:00	249.92
01-06-2001 0:00	254.44	01-05-2001 0:00	250.09
01-07-2001 0:00	253.32	01-06-2001 0:00	250.07
01-08-2001 0:00	252.39	01-07-2001 0:00	249.84
01-09-2001 0:00	251.63	01-08-2001 0:00	249.58
01-10-2001 0:00	250.98	01-09-2001 0:00	249.31
01-11-2001 0:00	250.35	01-10-2001 0:00	249.02
01-12-2001 0:00	250.06	01-11-2001 0:00	248.87
01-01-2002 0:00	249.79	01-12-2001 0:00	248.5
01-02-2002 0:00	249.46	01-01-2002 0:00	248.27
01-03-2002 0:00	249.16	01-02-2002 0:00	248.28
01-04-2002 0:00	249.13	01-03-2002 0:00	247.99
01-05-2002 0:00	250.03	01-04-2002 0:00	248.51
01-06-2002 0:00	249.89	01-05-2002 0:00	248.93
01-07-2002 0:00	249.39	01-06-2002 0:00	248.36
01-08-2002 0:00	249.1	01-07-2002 0:00	247.93
01-09-2002 0:00	248.85	01-08-2002 0:00	247.66
01-10-2002 0:00	248.55	01-09-2002 0:00	247.38
01-11-2002 0:00	248.23	01-10-2002 0:00	247.13
08-11-2002 12:00	248.14	01-11-2002 0:00	246.82
27-02-2003 12:28	247.76	05-11-2002 19:12	246.78
12-05-2003 10:04	249.9	01-12-2002 0:00	246.51
20-08-2003 9:07	248.71	01-01-2003 0:00	246.8
14-10-2003 9:07	247.97	01-02-2003 0:00	247.41
18-02-2004 11:31	248.79	27-02-2003 9:36	247.59
18-05-2004 10:19	250.45	13-05-2003 12:00	247.92
07-09-2004 15:36	248.85	20-08-2003 9:36	247.01
		14-10-2003 12:00	246.64
		18-02-2004 14:24	247.78
		20-04-2004 12:00	248.59
		18-05-2004 12:00	248.32
		08-09-2004 9:36	247.42
		27-01-2005 16:48	246.16
		01-02-2005 0:00	246.17
		01-03-2005 0:00	245.92
		01-04-2005 0:00	245.6
		01-05-2005 0:00	245.27
		23-05-2005 21:36	245
		31-05-2005 12:00	244.93
		01-07-2005 0:00	244.46
		01-08-2005 0:00	244.15
		01-09-2005 0:00	243.81
		01-10-2005 0:00	243.73

VVn	
01-10-2000 0:00	235.34
01-11-2000 0:00	235.21
01-12-2000 0:00	235.18
01-01-2001 0:00	235.49
01-02-2001 0:00	236.57
01-03-2001 0:00	238.15
01-04-2001 0:00	239.77
01-05-2001 0:00	240.38
01-06-2001 0:00	240.52
01-07-2001 0:00	240.39
01-08-2001 0:00	240.14
01-09-2001 0:00	239.86
01-10-2001 0:00	239.55
01-11-2001 0:00	239.19
01-12-2001 0:00	238.85
01-01-2002 0:00	238.61
01-02-2002 0:00	238.37
01-03-2002 0:00	238.23
01-04-2002 0:00	238.11
01-05-2002 0:00	238.19
01-06-2002 0:00	238.17
01-07-2002 0:00	237.99
01-08-2002 0:00	237.73
01-09-2002 0:00	237.4
01-10-2002 0:00	237.09
01-11-2002 0:00	236.96
05-11-2002 18:57	236.94
01-12-2002 0:00	236.84
01-01-2003 0:00	236.76
01-02-2003 0:00	236.94
27-02-2003 9:07	237.11
13-05-2003 11:02	237.82
01-06-2003 0:00	237.75
01-07-2003 0:00	237.53
01-08-2003 0:00	237.33
20-08-2003 12:00	237.13
01-09-2003 0:00	237.01
01-10-2003 0:00	236.73
14-10-2003 13:55	236.62
01-11-2003 0:00	236.53
01-12-2003 0:00	236.51
01-01-2004 0:00	236.81
01-02-2004 0:00	237
18-02-2004 16:04	237.01
01-03-2004 0:00	237.13
01-04-2004 0:00	237.46
20-04-2004 12:57	237.53
01-05-2004 0:00	237.54
18-05-2004 15:07	237.54
01-06-2004 0:00	237.48
01-07-2004 0:00	237.25
01-08-2004 0:00	236.7
01-09-2004 0:00	236.35
08-09-2004 12:57	236.26
01-10-2004 0:00	236.05
27-01-2005 17:02	235.54
24-05-2005 11:02	234.923
31-05-2005 11:02	234.913
14-09-2005 15:10	234.443

Anexo IV

Níveis piezométricos simulados pelo *modelo simples* e pelo modelo *MF38*

Piezometria simulada pelo *modelo simples*

01-10-2000	VV_s	RL_s	PA_s	MB_s	LA1_s	CC_s	3B_s
01-11-2000	237.13	247.04	249.9	190.34	199.66	191.23	190.27
01-12-2000	237.27	247.17	249.84	190.37	199.66	191.27	190.32
01-01-2001	238.16	248.14	250.52	190.7	199.85	191.64	190.62
01-02-2001	238.93	249.01	251.21	190.94	200.11	191.88	190.82
01-03-2001	239.09	249.25	251.4	190.99	200.3	191.92	190.84
01-04-2001	239.42	249.69	251.82	191.08	200.52	192.01	190.91
01-05-2001	239.25	249.55	251.72	190.92	200.59	191.82	190.75
01-06-2001	239.02	249.28	251.39	190.79	200.59	191.68	190.64
01-07-2001	238.9	249.11	251.14	190.69	200.56	191.57	190.55
01-08-2001	238.49	248.58	250.62	190.39	200.39	191.24	190.28
01-09-2001	238.13	248.1	250.12	190.12	200.15	190.94	190.05
01-10-2001	238.02	247.93	250.05	190.05	199.97	190.88	190
01-11-2001	238.25	248.17	250.43	190.24	199.93	191.12	190.19
01-12-2001	238.26	248.18	250.51	190.36	199.94	191.27	190.31
01-01-2002	238.19	248.11	250.48	190.39	199.95	191.3	190.34
01-02-2002	238.29	248.21	250.55	190.44	199.97	191.36	190.39
01-03-2002	238.16	248.05	250.34	190.38	199.94	191.29	190.33
01-04-2002	238.3	248.2	250.48	190.4	199.94	191.3	190.35
01-05-2002	238.73	248.67	250.88	190.54	200.02	191.45	190.47
01-06-2002	238.7	248.65	250.84	190.51	200.05	191.41	190.43
01-07-2002	238.33	248.23	250.45	190.31	199.97	191.18	190.25
01-08-2002	237.94	247.76	249.93	190.08	199.81	190.92	190.03
01-09-2002	237.6	247.3	249.44	189.87	199.6	190.69	189.85
01-10-2002	237.77	247.37	249.28	189.87	199.47	190.71	189.87
01-11-2002	238.1	247.65	249.45	190.12	199.51	191	190.11
01-12-2002	238.16	247.71	249.63	190.33	199.61	191.24	190.3
01-01-2003	238.39	247.99	249.95	190.42	199.71	191.33	190.37
01-02-2003	238.54	248.19	250.25	190.46	199.8	191.37	190.4
01-03-2003	238.68	248.39	250.53	190.48	199.88	191.39	190.41
01-04-2003	238.64	248.38	250.55	190.45	199.92	191.35	190.38
01-05-2003	238.47	248.2	250.3	190.41	199.93	191.32	190.36
01-06-2003	238.27	247.97	250.02	190.33	199.89	191.22	190.28
01-07-2003	237.86	247.5	249.55	190.15	199.78	191.02	190.12
01-08-2003	237.52	247.06	249.08	189.96	199.6	190.8	189.94
01-09-2003	237.18	246.62	248.61	189.75	199.38	190.57	189.77
01-10-2003	236.88	246.2	248.17	189.61	199.16	190.42	189.65
01-11-2003	237.23	246.49	248.41	189.79	199.1	190.66	189.84
01-12-2003	237.95	247.25	249.1	190.14	199.23	191.05	190.15
01-01-2004	238.2	247.55	249.38	190.27	199.37	191.18	190.26
01-02-2004	238.06	247.41	249.3	190.26	199.45	191.16	190.24
01-03-2004	238.03	247.4	249.32	190.26	199.51	191.16	190.24
01-04-2004	238.04	247.43	249.38	190.29	199.57	191.2	190.27
01-05-2004	237.77	247.14	249.14	190.22	199.56	191.12	190.2
01-06-2004	237.57	246.95	249.05	190.14	199.52	191.03	190.13
01-07-2004	237.33	246.7	248.88	190.05	199.44	190.92	190.04
01-08-2004	236.93	246.24	248.38	189.84	199.28	190.69	189.85
01-09-2004	236.71	245.93	248.01	189.67	199.09	190.5	189.71
01-10-2004	236.59	245.71	247.68	189.6	198.92	190.42	189.65
01-11-2004	236.76	245.84	247.72	189.8	198.91	190.67	189.84

(Continua na página seguinte)

Piezometria simulada pelo *modelo simples* (cont.)

Cont.	VV_s	RL_s	PA_s	MB_s	LA1_s	CC_s	3B_s
01-12-2004	236.77	245.83	247.76	189.96	198.96	190.86	190
01-01-2005	236.44	245.45	247.42	189.89	198.93	190.78	189.94
01-02-2005	236.17	245.11	247.09	189.83	198.87	190.72	189.89
01-03-2005	235.87	244.74	246.77	189.77	198.8	190.66	189.84
01-04-2005	235.56	244.35	246.4	189.75	198.72	190.64	189.83
01-05-2005	235.26	243.96	245.98	189.72	198.63	190.61	189.8
01-06-2005	234.96	243.6	245.75	189.69	198.53	190.58	189.78
01-07-2005	234.66	243.27	245.53	189.61	198.41	190.49	189.71
01-08-2005	234.36	242.9	245.1	189.43	198.23	190.27	189.54
01-09-2005	234.07	242.53	244.67	189.24	198.01	190.06	189.37
01-10-2005	233.79	242.16	244.27	189.11	197.8	189.92	189.26
01-11-2005	233.51	241.78	243.86	189.08	197.64	189.91	189.25
01-12-2005	233.24	241.41	243.47	189.11	197.53	189.98	189.31
01-01-2006	232.96	241.04	243.07	189.12	197.43	190	189.33

Piezometria simulada pelo *modelo MF38*

01-10-2000	VV_MF38	RL_MF38	PA_MF38	MB_MF38	LA1_MF38	CC_MF38	3B_MF38
01-11-2000	236.213	245.49	249.043	190.507	200.822	191.67	190.326
01-12-2000	236.389	245.732	248.99	190.655	201.177	191.819	190.44
01-01-2001	237.463	246.892	250.237	191.098	201.585	192.302	190.831
01-02-2001	238.427	247.962	251.385	191.418	201.963	192.626	191.056
01-03-2001	238.756	248.385	251.665	191.53	202.2	192.731	191.109
01-04-2001	239.165	248.912	252.209	191.628	202.401	192.832	191.18
01-05-2001	239.065	248.818	251.824	191.474	202.411	192.649	191.008
01-06-2001	238.877	248.581	251.099	191.291	202.253	192.451	190.856
01-07-2001	238.708	248.374	250.496	191.093	201.989	192.228	190.679
01-08-2001	238.262	247.86	249.555	190.736	201.606	191.819	190.357
01-09-2001	237.811	247.355	248.708	190.395	201.176	191.441	190.092
01-10-2001	237.629	247.202	248.707	190.256	200.837	191.303	190.019
01-11-2001	237.843	247.49	249.487	190.42	200.75	191.522	190.227
01-12-2001	237.869	247.578	249.754	190.564	200.789	191.704	190.365
01-01-2002	237.806	247.576	249.817	190.618	200.811	191.769	190.408
01-02-2002	237.853	247.715	249.967	190.671	200.833	191.83	190.457
01-03-2002	237.689	247.6	249.659	190.614	200.794	191.763	190.391
01-04-2002	237.825	247.796	249.979	190.623	200.775	191.775	190.404
01-05-2002	238.278	248.315	250.696	190.749	200.842	191.916	190.527
01-06-2002	238.309	248.361	250.649	190.688	200.785	191.827	190.431
01-07-2002	237.914	247.958	249.947	190.438	200.543	191.534	190.176
01-08-2002	237.442	247.456	249.052	190.148	200.215	191.206	189.932
01-09-2002	237.024	246.977	248.265	189.88	199.856	190.906	189.726
01-10-2002	237.183	247.06	248.12	189.84	199.627	190.875	189.735
01-11-2002	237.52	247.386	248.591	190.077	199.655	191.166	189.989
01-12-2002	237.639	247.54	249.086	190.324	199.824	191.459	190.213
01-01-2003	237.904	247.875	249.793	190.453	199.988	191.599	190.304
01-02-2003	238.132	248.135	250.361	190.51	200.111	191.657	190.336
01-03-2003	238.361	248.39	250.89	190.55	200.203	191.7	190.364
01-04-2003	238.34	248.405	250.866	190.524	200.241	191.667	190.338
01-05-2003	238.158	248.249	250.402	190.487	200.237	191.627	190.3
01-06-2003	237.807	247.999	249.835	190.358	200.101	191.476	190.172
01-07-2003	237.312	247.523	249.015	190.116	199.822	191.199	189.94
01-08-2003	236.913	247.058	248.264	189.869	199.502	190.917	189.735
01-09-2003	236.453	246.609	247.586	189.619	199.161	190.634	189.537
01-10-2003	236.147	246.19	247.007	189.431	198.843	190.432	189.397
01-11-2003	236.614	246.528	247.687	189.613	198.799	190.675	189.629
01-12-2003	237.429	247.374	249.09	189.991	199.035	191.119	189.987
01-01-2004	237.833	247.801	249.752	190.182	199.278	191.315	190.108
01-02-2004	237.772	247.725	249.655	190.204	199.414	191.33	190.095
01-03-2004	237.774	247.731	249.697	190.225	199.495	191.355	190.111
01-04-2004	237.791	247.766	249.79	190.259	199.56	191.394	190.14
01-05-2004	237.483	247.505	249.364	190.193	199.548	191.316	190.075
01-06-2004	237.225	247.303	249.236	190.078	199.418	191.184	189.967
01-07-2004	236.916	247.035	248.961	189.912	199.186	190.993	189.809
01-08-2004	236.385	246.561	248.154	189.656	198.883	190.695	189.582
01-09-2004	236.08	246.219	247.61	189.435	198.574	190.445	189.415
01-10-2004	235.947	245.981	247.165	189.309	198.315	190.312	189.33
01-11-2004	236.078	246.126	247.433	189.5	198.302	190.561	189.561

(continua na página seguinte)

Piezometria simulada pelo *modelo MF38* (continuação)

Cont.	VV_MF38	RL_MF38	PA_MF38	MB_MF38	LA1_MF38	CC_MF38	3B_MF38
01-12-2004	236.042	246.155	247.65	189.693	198.422	190.796	189.739
01-01-2005	235.736	245.833	247.261	189.672	198.454	190.772	189.696
01-02-2005	235.45	245.491	246.816	189.623	198.425	190.727	189.664
01-03-2005	235.161	245.144	246.43	189.572	198.364	190.676	189.627
01-04-2005	234.868	244.779	245.987	189.556	198.29	190.665	189.629
01-05-2005	234.557	244.415	245.469	189.524	198.211	190.629	189.6
01-06-2005	234.207	244.092	245.343	189.459	198.053	190.549	189.533
01-07-2005	233.868	243.791	245.207	189.318	197.81	190.381	189.388
01-08-2005	233.502	243.448	244.747	189.092	197.521	190.113	189.183
01-09-2005	233.142	243.092	244.279	188.867	197.216	189.855	189.004
01-10-2005	232.863	242.744	243.855	188.701	196.933	189.677	188.88
01-11-2005	233.127	242.97	244.217	188.845	196.887	189.874	189.07
01-12-2005	233.591	243.47	244.99	189.158	197.081	190.249	189.372
01-01-2006	233.82	243.696	245.331	189.325	197.283	190.425	189.485

Anexo V

Caudais dos furos utilizados na simulação.

Caudais dos vários tipos de furos em m³/dia

Tipo de furo-->	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
01-11-2000 0:00	-2987.7	-467.68	-2276	0	0	-20	0
01-12-2000 0:00	-2861.6	-489.03	-2276	0	0	-20	0
01-01-2001 0:00	-2807.4	-469.9	-2276	0	0	-20	0
01-02-2001 0:00	-2745.5	-496.08	-2276	0	0	-20	0
01-03-2001 0:00	-2791.8	-549.23	-2276	0	0	-20	0
31-03-2001 0:00	-2914	-512.62	-2276	0	0	-20	0
01-05-2001 0:00	-2906.5	-496.08	-2276	0	0	-25	-10
01-06-2001 0:00	-2813.9	-496.08	-4260	-640	0	-160	-40
01-07-2001 0:00	-3521.7	-512.62	-2884	-640	0	-160	-40
01-08-2001 0:00	-3537.4	-505.29	-7012	-640	0	-160	-40
01-09-2001 0:00	-3467.4	-543.23	-7012	-640	0	-160	-40
01-10-2001 0:00	-3444.7	-521.87	-7012	-640	0	-160	-40
01-11-2001 0:00	-2922.6	-467.68	-2276	0	0	-20	0
01-12-2001 0:00	-2782.7	-489.03	-2276	0	0	-20	0
01-01-2002 0:00	-2752.4	-469.9	-2276	0	0	-20	0
01-02-2002 0:00	-2745.5	-536.13	-2276	0	0	-20	0
01-03-2002 0:00	-2791.8	-511.79	-2276	0	0	-20	0
31-03-2002 0:00	-2914	-513.37	-2276	0	0	-20	0
01-05-2002 0:00	-2906.5	-457.87	-2276	0	0	-25	-10
01-06-2002 0:00	-2813.9	-480.13	-4260	-640	0	-160	-40
01-07-2002 0:00	-3521.7	-494.2	-2884	-640	0	-160	-40
01-08-2002 0:00	-3537.4	-516.23	-7012	-640	0	-160	-40
01-09-2002 0:00	-3467.4	-483.77	-7012	-640	0	-160	-40
01-10-2002 0:00	-3444.7	-460.9	-7012	-640	0	-160	-40
01-11-2002 0:00	-2922.6	-458.16	-2276	0	0	-20	0
01-12-2002 0:00	-2782.7	-451.13	-2276	0	0	-20	0
01-01-2003 0:00	-2752.4	-432.32	-2276	0	0	-20	0
01-02-2003 0:00	-2745.5	-354.11	-2276	0	0	-20	0
01-03-2003 0:00	-2791.8	-358.04	-2276	0	0	-20	0
01-04-2003 0:00	-2820	-382.71	-2276	0	0	-20	0
01-05-2003 0:00	-3003.3	-450.47	-2276	0	0	-25	-10
01-06-2003 0:00	-2813.9	-608.23	-4260	-640	0	-160	-40
01-07-2003 0:00	-3521.7	-509.83	-2884	-640	0	-160	-40
01-08-2003 0:00	-3537.4	-549.74	-7012	-640	0	-160	-40
01-09-2003 0:00	-3467.4	-640.29	-7012	-640	0	-160	-40
01-10-2003 0:00	-3444.7	-404.73	-7012	-640	0	-160	-40
01-11-2003 0:00	-2922.6	-390.87	-2276	0	0	-20	0
01-12-2003 0:00	-2782.7	-368.02	-2276	0	0	-20	0
01-01-2004 0:00	-2752.4	-356.23	-2276	0	0	-20	0
01-02-2004 0:00	-2745.5	-345.84	-2276	0	0	-20	0
01-03-2004 0:00	-2695.5	-359.03	-2276	0	0	-20	0
01-04-2004 0:00	-2820	-354.61	-2276	0	0	-20	0
01-05-2004 0:00	-3003.3	-492.03	-2276	0	0	-25	-10
01-06-2004 0:00	-2813.9	-397.48	-4260	-640	-640	-160	-40

Caudais dos vários tipos de furos em m³/dia (cont.)

Tipo de furo-->	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
01-07-2004 0:00	-3521.7	-505.55	-2884	-640	-640	-160	-40
01-08-2004 0:00	-3537.4	-523.75	-7012	-640	-640	-160	-40
01-09-2004 0:00	-3467.4	-408.97	-7012	-640	-640	-160	-40
01-10-2004 0:00	-3444.7	-385.83	-7012	-640	-640	-160	-40
01-11-2004 0:00	-2922.6	-438.9	-2276	0	0	-20	0
01-12-2004 0:00	-2782.7	-436.06	-2276	0	0	-20	0
01-01-2005 0:00	-2752.4	-419.48	-2276	0	0	-20	0
01-02-2005 0:00	-2745.5	-412.03	-2276	0	0	-20	0
01-03-2005 0:00	-2791.8	-413.89	-2276	0	0	-20	0
01-04-2005 0:00	-2820	-411.38	-2276	0	0	-20	0
01-05-2005 0:00	-3003.3	-471.88	-2276	0	0	-25	-10
01-06-2005 0:00	-2813.9	-495.28	-4260	-640	-640	-160	-40
01-07-2005 0:00	-3521.7	-503.19	-2884	-640	-640	-160	-40
01-08-2005 0:00	-3537.42	-529.91	-7012	-640.0	-640	-160	-40
01-09-2005 0:00	-3467.42	-511.01	-7012	-640.0	-640	-160	-40
01-10-2005 0:00	-3444.67	-417.16	-7012	-640.0	-640	-160	-40
01-11-2005 0:00	-2922.58	-429.31	-2276	0.0	0	-20	0
01-12-2005 0:00	-2782.73	-418.40	-2276	0.0	0	-20	0
01-01-2006 0:00	-2752.42	-402.68	-2276	0.0	0	-20	0