

# RESERVAS ESTRATÉGICAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NA REGIÃO CENTRO (PROJECTO IMAGES)

Teresa CONDESSO de MELO <sup>(1)</sup>; Judite FERNANDES <sup>(2)</sup>; Carla MIDÕES <sup>(2)</sup>; Carlos COSTA ALMEIDA <sup>(2)</sup>; Helena AMARAL <sup>(2)</sup>; Ana Rita GOMES <sup>(3)</sup>; Maria José MADRUGA <sup>(3)</sup>; Manuel MARQUES da SILVA <sup>(4)</sup>; LOPO MENDONÇA <sup>(5)</sup>;

*(1) CVRM – Centro de Geo-sistemas, Instituto Superior Técnico, Lisboa; (2) LNEG, Laboratório Nacional de Energia e Geologia – Unidade de Águas Subterrâneas, Alfragide; (3) ITN, Instituto tecnológico e Nuclear, Sacavém; (4) GeoBioTec, Universidade de Aveiro, Aveiro; (5) Centro de Geociências, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.*

## Resumo

No âmbito do projecto IMAGES financiado pelo Programa Operacional Ciência e Inovação 2010 da Fundação para a Ciência e Tecnologia (POCI/CTE-GEX/59817/2004) procedeu-se à identificação, caracterização e avaliação de algumas massas de água subterrânea que podem ser usadas como reservas estratégicas no caso de eventos hidrológicos extremos, catástrofes, ataques terroristas e outros conflitos, preocupação partilhada com as autoridades responsáveis pela água.

Dos 27 sistemas aquíferos existentes na Orla Ocidental Portuguesa foram objecto de um estudo hidrogeológico, hidrogeoquímico e isotópico, oito sistemas da região centro: Alpedriz, Condeixa - Alfarelos, Figueira da Foz - Gesteira, Leirosa - Monte Real, Louriçal, Pousos - Caranguejeira, Vieira de Leiria - Marinha Grande e Viso - Queridas. Esta selecção baseou-se no facto de o contexto geológico e estrutural de alguns destes aquíferos ser muito semelhante ao aquífero Cretácico de Aveiro, que corresponde a parte de uma espessa sequência de sedimentos do Mesocenozóico subjacentes a depósitos do Quaternário, do qual já se conhecia a existência de águas pristinas de baixa salinidade e excelente qualidade, com idade compreendida entre 10 e 30ka.

A metodologia adoptada envolveu, numa primeira fase, o levantamento exaustivo dos relatórios de furos de captação de água, com mais de 180 m de profundidade, da região litoral-centro. Efectuou-se o enquadramento hidro-lito-estratigráfico dos níveis aquíferos potencialmente interessantes e determinou-se a geometria 3D das massas de água profundas.

Numa segunda fase, fez-se determinação da idade aparente das águas subterrâneas, através da determinação do teor de trítio e que permitiu distinguir águas modernas, com trítio, de águas mais antigas (anteriores a 1952), sem trítio. Nestas águas mais antigas, realizou-se uma caracterização geoquímica mais detalhada, determinando elementos maiores, menores e vestigiais, assim como  $^{14}\text{C}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ .

Os resultados hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos de 13 furos profundos dos sistemas aquíferos Condeixa - Alfarelos, Leirosa - Monte Real, Vieira de Leiria - Marinha Grande e Pousos - Caranguejeira, confirmaram a existência de águas com elevados tempos de residência (algumas no limiar das paleoáguas com 22000 anos) e condições de recarga diferentes das actuais, pelo que podem constituir reservas estratégicas de água doce com um nível de vulnerabilidade relativamente baixo e uma capacidade de atenuação de contaminantes relativamente elevada.

Palavras-chave: água subterrânea, reservas estratégicas, região centro.

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas (cheias e secas), os fenómenos geológicos, tais como sismos e escorregamentos de terrenos, e a contaminação provocada por acidentes nucleares e industriais, podem causar sérios problemas na qualidade da água fornecida e nos sistemas de abastecimento público. É igualmente conhecido o facto de nos países europeus onde as temperaturas são elevadas, as águas das albufeiras apresentarem frequentemente problemas de qualidade, devido ao desenvolvimento anormal de algas por processos de eutrofização, e à presença de espécies químicas anóxicas formadas em profundidade, sob condições de baixo potencial redox, e que limitam o uso da água para consumo humano. A contaminação difusa de origem agrícola, afecta igualmente os reservatórios de água superficial e subterrânea, com um tempo de residência curto. Neste contexto, a identificação, caracterização e avaliação das massas de água subterrânea que podem ser usadas como reservas estratégicas no caso de eventos hidrológicos extremos, catástrofes, ataques terroristas e outros conflitos, é cada vez mais uma preocupação das autoridades responsáveis pela água e constituiu o principal objectivo do projecto IMAGES. Estas massas devem caracterizar-se por possuírem água de boa qualidade, baixa vulnerabilidade e tempos de residência longos. Com base nestas premissas foram seleccionados 8 sistemas aquíferos da região centro litoral que foram objecto de estudo.

## 2 METODOLOGIA ADOPTADA

Procurou-se seleccionar sistemas aquíferos com um contexto geológico e estrutural semelhante ao de Aveiro, com uma espessa sequência de sedimentos do Mesocenozóico subjacentes a depósitos do Quaternário, onde se conhece a existência de águas pristinas de baixa salinidade e excelente qualidade, com idade compreendida entre 10 e 30ka. Os sistemas seleccionados foram: Alpedriz, Condeixa - Alfarelos, Figueira da Foz - Gesteira, Leirosa - Monte Real, Lourical, Pousos - Caranguejeira, Vieira de Leiria - Marinha Grande e Viso - Queridas.

A metodologia adoptada envolveu, numa primeira fase, um levantamento exaustivo dos relatórios de furos de captação de água, com mais de 180 m de profundidade, da região litoral-centro. Processaram-se dados geológicos e hidrogeológicos de 187 furos. Efectuou-se o enquadramento hidro-lito-estratigráfico dos níveis aquíferos potencialmente interessantes e determinou-se a geometria 3D das massas de água profundas. Avaliou-se a estabilidade química das águas com base nos dados históricos.

Numa segunda fase, fez-se a caracterização hidrogeoquímica das águas de 35 furos seleccionados (Fig. 1) e determinou-se a idade aparente, através do teor de trítio, que permitiu distinguir águas modernas, com trítio, de águas mais antigas (anteriores a 1952), sem trítio.

Posteriormente, escolheram-se 13 pontos de água potencialmente mais antiga (Fig. 2), com base nos seguintes critérios:

- foram eliminados os pontos com teores de trítio e nitrato, uma vez que a existência de trítio indica águas modernas e valores consideráveis de nitrato indiciam alguma contaminação, resultante de eventual mistura no próprio furo por captar níveis de diferente qualidade e/ou pouco confinamento dos níveis superiores;
- foram eliminadas águas com mineralização excessiva;
- foram considerados pontos onde a profundidade da zona captada, as formações litoestratigráficas captadas e o confinamento dados pelos níveis sobrejacentes fossem mais favoráveis;
- foram considerados pontos que permitissem datar águas antigas e seguir a evolução da idade da água ao longo de uma linha de fluxo.

Na terceira fase e para estas águas mais antigas realizou-se uma caracterização geoquímica mais detalhada, determinando elementos maiores, menores e vestigiais, assim como  $^{14}\text{C}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ .

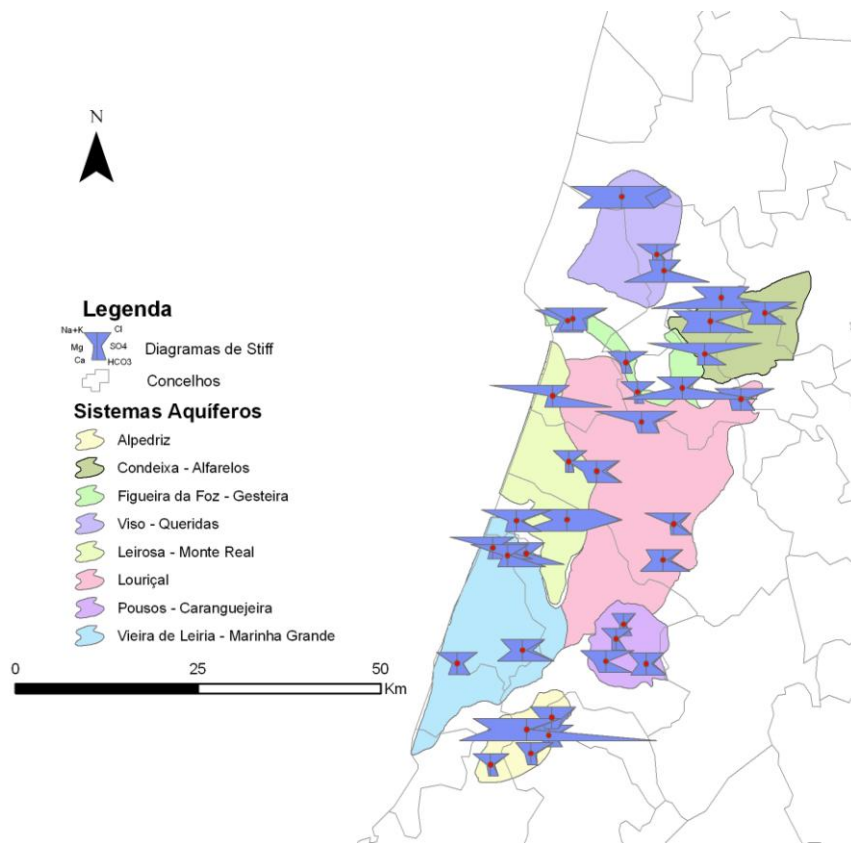


Figura 1. Representação espacial dos diagramas de Stiff dos 35 pontos amostrados.

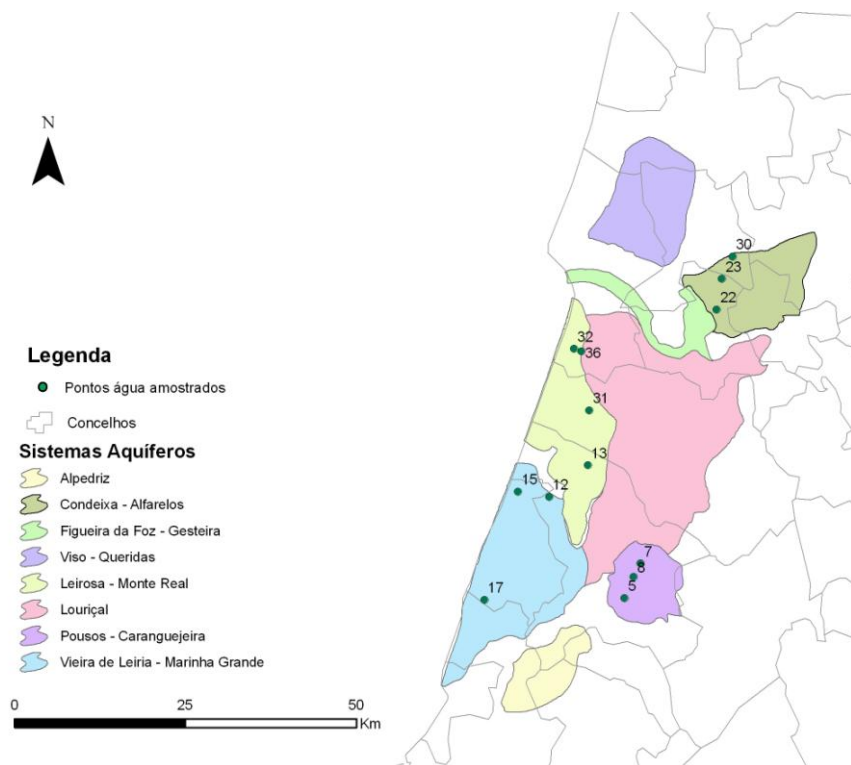


Figura 2. Representação espacial dos 13 pontos seleccionados para uma caracterização geoquímica mais detalhada.

### 3 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA

Os 13 pontos seleccionados para caracterização geoquímica, com a determinação de elementos maiores, menores e vestigiais, assim como  $^{14}\text{C}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ , distribuem-se pelos sistemas aquíferos de Condeixa-Alfarelos, Leirosa – Monte Real, Vieira de Leiria – Marinha Grande e Pousos – Caranguejeira. Os resultados obtidos para os parâmetros medidos *in situ*, composição química maioritária e elementos vestigiais, encontram-se expressos nos quadros 1, 2 e 3.

ID	Nome_furo	Localização	Prof.	Data	T	pH	Eh	pe	O2	CE	TDS	HCO3
			m		°C		mV	V	mg/L	µS/cm	mg/L	mg/L
5	JK6	Pousos	405	26-02-2008	17,1	6,14	45	0,8	1,50	252	176	69,0
7	SL12	Boavista	273	26-02-2008	17,5	5,55	100	1,7	7,32	94	65	10,7
8	SL5	Santa Eufémia	269	26-02-2008	19,5	5,62	107	1,8	7,22	124	86	14,5
12	AC1	Carvide	403	26-02-2008	24,2	8,05	121	2,0	3,05	329	230	106,1
15	AC1	Vieira de Leiria	277	26-02-2008	19,3	6,70	115	2,0	3,53	291	205	97,5
17	HO-3	Pícosos, Marinha Grande	200	26-02-2008	17,7	5,82	45	0,8	1,95	190	133	25,0
22	JK15	Vila Nova de Anços	252	27-02-2008	21,2	5,72	155	2,7	5,33	459	323	37,8
23	JK14	Casal de S. Pedro	229	27-02-2008	20,8	6,27	145	2,5	5,31	495	346	98,1
30	PS-5	Pereira do Campo	264	27-02-2008	22,5	6,74	130	2,2	2,46	669	479	173,0
13	AC15	Paúl	126	26-02-2008	18,2	6,20	131	2,3	5,15	463	325	31,1
31	AC P2	Mata do Urso	233	27-02-2008	16,8	5,47	153	2,7	5,36	139	97	7,4
32	AC 1	Lavos	647	27-02-2008	24,0	8,58	-169	-2,9	1,19	466	326	180,3
36	AC3	Lavos	570	27-02-2008	28,0	9,10	-121	-2,0	1,72	473	331	148,3

Quadro 1 – Parâmetros físico-químicos medidos *in situ* para os 13 pontos seleccionados.

ID	Sistema Aquífero	Na	K	Ca	Mg	Si	Cl	CO3	SO4	NO3_N	PO4_P	Br	F	Dureza
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	calc	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
5	Pousos_Caranguejeira	33,2	2,7	6,3	7,0	4,9	43,1	0,0	2,4	0,0	0,0	0,3	0,0	45,0
7	Pousos_Caranguejeira	12,1	3,7	2,7	2,0	6,5	17,9	0,0	2,7	0,8	0,0	0,0	0,0	15,0
8	Pousos_Caranguejeira	14,9	4,6	3,8	2,4	7,1	23,2	0,0	2,8	0,3	0,0	0,1	0,0	19,5
12	V. Leiria_Marinha Grande	59,9	2,2	10,7	1,0	8,3	32,5	0,6	4,5	0,0	0,0	0,1	0,1	31,0
15	V. Leiria_Marinha Grande	57,1	2,5	4,6	2,5	8,3	39,2	0,0	4,7	0,0	0,1	0,1	0,2	21,9
17	V. Leiria_Marinha Grande	25,1	2,4	7,6	2,8	7,5	36,0	0,0	12,5	0,0	0,1	0,1	0,0	30,8
22	Condeixa_Alfarelos	69,0	6,2	6,2	4,3	9,4	104,0	0,0	4,1	0,3	0,0	0,3	0,0	33,3
23	Condeixa_Alfarelos	42,3	11,2	25,3	12,7	6,9	75,9	0,0	9,3	1,0	0,1	0,2	0,1	116,2
30	Condeixa_Alfarelos	33,5	5,3	58,7	9,4	6,4	48,1	0,0	29,6	0,2	0,0	0,2	0,1	186,0
13	Leirosa_Monte Real	33,7	3,0	44,8	8,2	7,9	45,0	0,0	125,0	0,8	0,0	0,1	0,0	146,0
31	Leirosa_Monte Real	19,5	2,7	2,6	2,6	6,3	30,9	0,0	4,8	0,9	0,0	0,2	0,0	17,3
32	Leirosa_Monte Real	83,9	3,2	7,6	2,4	8,2	27,9	3,4	5,5	0,0	0,0	0,1	0,3	29,2
36	Leirosa_Monte Real	83,6	0,6	1,3	0,3	10,6	29,8	9,2	6,2	0,0	0,0	0,1	0,2	4,4

Quadro 2 – Composição química maioritária dos 13 pontos.

Globalmente as águas apresentam boa qualidade embora existam pontualmente concentrações excessivas (a vermelho no quadro 3) para o As, Cu, Fe e Mn, quando comparadas com o valor de referência para produção de água para consumo humano.

O elevado teor de sulfato da água ID 13, deverá ter origem nas margas do Hetangiano presente nas estruturas diápiricas do sistema aquífero Leirosa - Monte Real.

ID	Al	As	B	Ba	Cr	Cu	Fe	Li	Mn	Ni	Rb	Sc	Se	Sr	Ti	U	V	Zn
	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
5	<LD	<LD	5	192	<LD	<LD	3550	1	178,0	1,2	11,7	2	0,2	60	0,9	0,1	0,1	9,7
7	4	0,2	7	27	<LD	0,9	<LD	1	0,7	2,6	17,9	2	0,4	17	1,1	0,3	0,2	13,8
8	2	0,2	10	35	<LD	1,8	<LD	2	0,5	1,1	22,8	2	0,3	18	1,1	0,4	0,3	8,9
12	2	10,6	36	69	6,7	<LD	<LD	5	1,5	<LD	1,2	2	0,6	47	1,3	1,4	6,3	2,9
15	2	28,6	64	16	3	1,2	<LD	1	0,4	0,3	6,3	2	0,8	30	1,8	0,4	11,0	12,3
17	<LD	2,0	16	34	<LD	1,2	290	2	36,5	0,8	5,9	2	0,4	45	1,2	0,0	0,7	16,9
22	7	0,7	23	40	1,1	4,3	<LD	8	1,4	0,7	11,5	3	1,2	32	1,7	0,1	1,1	7,8
23	3	0,3	23	42	0,8	1,2	<LD	7	0,3	0,3	17,9	2	1,0	106	1,1	0,2	0,9	6,6
30	<LD	0,3	23	91	<LD	<LD	<LD	5	1,1	<LD	10,3	2	0,9	165	0,9	0,6	0,5	10,0
13	3	0,2	17	26	0,7	0,8	<LD	5	0,5	1	5,8	2	0,7	>200	1,1	0,1	0,5	7,7
31	3	0,2	12	22	<LD	5,5	<LD	1	3,8	<LD	8,5	2	0,4	26	1,0	0,0	0,3	24,5
32	3	4,2	88	56	<LD	<LD	80	5	6,4	<LD	3,5	2	0,3	39	1,5	0,2	0,1	0,9
36	21	6,3	43	6	0,5	<LD	220	4	4,6	0,7	0,8	3	0,4	6	1,6	0,4	0,5	0,6
Min	2	0,2	5	6	0,5	0,8	80	1,0	0,3	0,3	0,8	2	0,2	6	0,9	0,0	0,1	0,6
1º Quartil	2	0,2	12	26	0,7	1,1		1,0	0,5	0,7	5,8	2	0,4	24	1,1	0,1	0,3	6,6
2º Quartil	3	0,5	23	35	1,0	1,2		4,0	1,4	0,8	8,5	2	0,4	35	1,1	0,2	0,5	8,9
3º Quartil	4	4,7	36	56	2,5	2,4		5,0	4,6	1,1	11,7	2	0,8	50	1,5	0,4	0,9	12,3
Max	21	28,6	88	192	6,7	5,5	3550	8,0	178,0	2,6	22,8	3	1,2	165	1,8	1,4	11,0	24,5
Valor_Ref	200	10	1000		50	2	200		50	20			10					

Quadro 3 – Concentrações dos elementos vestigiais.

As águas identificadas com as referências ID 12 (Vieira de Leiria-Marinha Grande), 32 e 36 (Leirosa - Monte Real) e 30 (Condeixa - Alfaiates) destacam-se das restantes, apresentando temperaturas elevadas, acima de 22°C (Fig. 3). A temperatura máxima encontrada é de 28°C para o ponto 36.

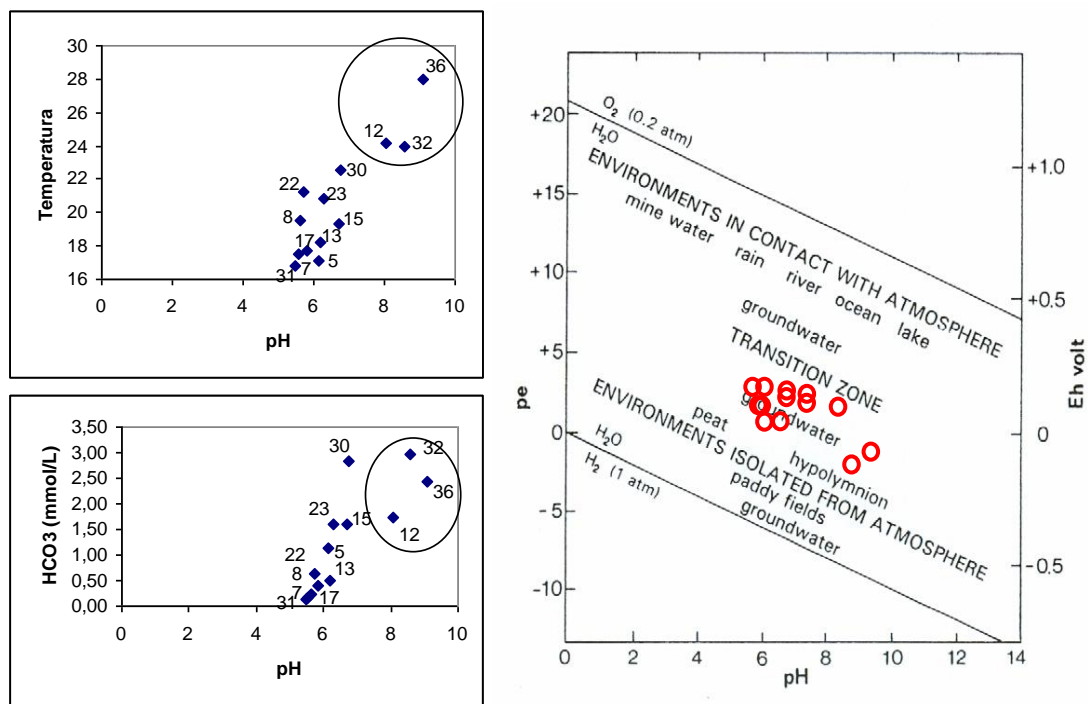


Figura 3. Gráficos de projecção dos parâmetros de campo Temp/pH, HCO3/pH, pH/pe/Eh (adaptado de Garrels and Christ, in Appelo & Postma, 2005).

No diagrama pe/pH estas águas projectam-se como água subterrânea muito perto de ambientes isolados da atmosfera, embora todas as 13 águas seleccionadas se projectem na metade inferior do gráfico, ou seja abaixo da zona de transição para ambientes em contacto com a atmosfera (Fig. 3). Este facto é reforçado pelas concentrações de alguns compostos indicadores de processos redox.

Essas concentrações podem ser utilizadas para avaliar a evolução da água subterrânea em termos dos referidos processos (Fig. 4). Assim, maiores concentrações de oxigénio dissolvido, normalmente acompanhadas da ausência de Ferro e Manganês, ou sua presença em concentrações baixas e presença de nitratos, são características de águas com menor tempo de residência ou que não foram sujeitas a processos redutores (exemplos ID 7, 8, 13, 22, 23 e 31). Maiores tempos de residência, ou passagem através de barreiras redox, conduzem à eliminação sucessiva do oxigénio dissolvido, nitrato e a solubilização do ferro e manganês (exemplos ID 5, 17, 32 e 36). A tendência evolutiva pode levar à redução dos sulfatos, acompanhada da presença de sulfureto de hidrogénio, o que se observou nos pontos 32 e 36. Normalmente, a presença de sulfuretos é acompanhada da diminuição da concentração de metais pesados, incluindo o ferro, devido à formação de sulfuretos metálicos, de solubilidade muito baixa.

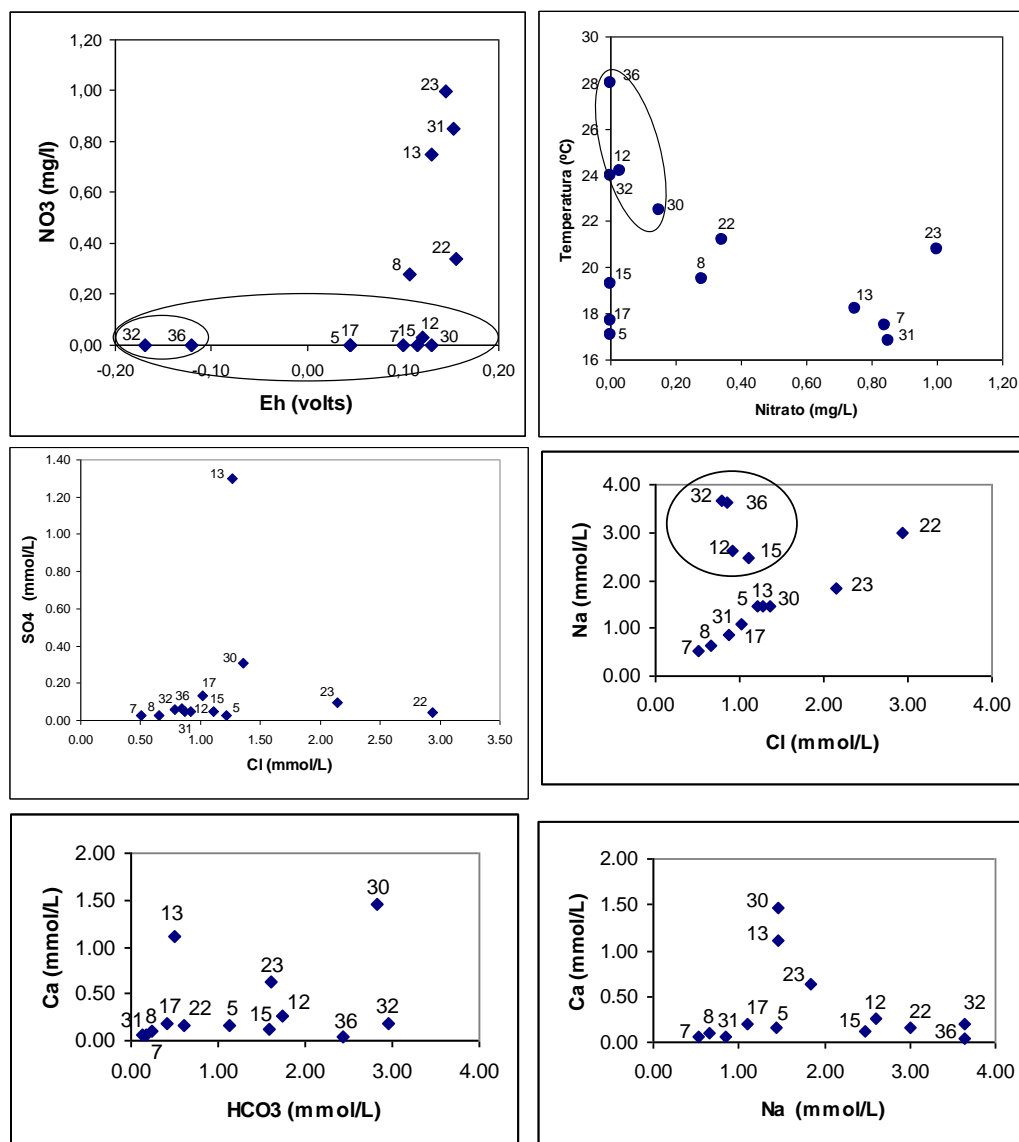


Figura 4. Gráficos de projecção dos parâmetros Eh/NO<sub>3</sub>, Temp/NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>/Cl, Ca/HCO<sub>3</sub>, Ca/Na, Na/Cl.

Note-se, no entanto, que no presente caso, as concentrações baixas de nitratos deverão resultar também de baixas concentrações daquele composto na água de recarga, uma vez que esta se processou em épocas onde ainda era desconhecida a aplicação de fertilizantes, conforme será indicado mais adiante, quando forem apresentados os resultados da datação.

O abrandamento (diminuição da dureza) que se verifica nos pontos ID 12, 15, 32 e 36, acompanhado do enriquecimento relativo em sódio é indicador de processos de troca iónica, provavelmente relacionados com a presença de camadas com lignitos, facto referido nas notícias explicativas das cartas geológicas.

O grupo de águas seleccionado provém de níveis aquíferos que, pelo facto de apresentarem produtividade elevada nos furos, pouca ou nenhuma vulnerabilidade, nalguns casos excelente qualidade e estabilidade química, poderão constituir reservas estratégicas.

## 4 INTERPRETAÇÃO DA ASSINATURA ISOTÓPICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

### 4.1 Isótopos estáveis ( $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{13}\text{C}$ )

A representação dos resultados das análises de isótopos estáveis de oxigénio e deutério para os diferentes sistemas aquíferos estudados num diagrama clássico  $\delta^{18}\text{O}$  -  $\delta^2\text{H}$  onde está representada também a recta meteórica global e a recta meteórica local (neste caso, foi usada a da região do Baixo Vouga, localizada a norte da zona de estudo) pode fornecer informações importantes sobre a origem das águas subterrâneas e as condições de recarga subterrânea.

A maioria das amostras encontra-se representada no diagrama  $\delta^{18}\text{O}$  -  $\delta^2\text{H}$  com um declive semelhante ao da recta meteórica global (declive,  $m \approx 8$ ), mas acima quer da recta meteórica global quer da recta meteórica local (Fig. 5), o que confirma que as condições de temperatura e precipitação em que se deu a sua infiltração são diferentes das actuais.

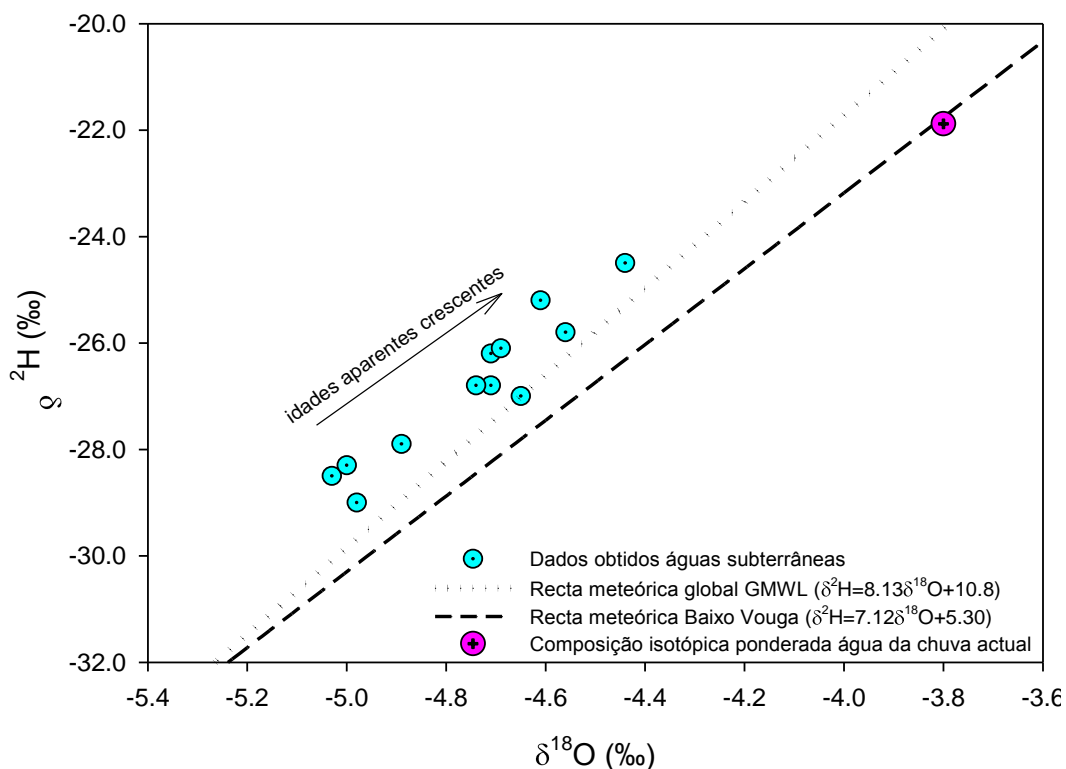


Figura 5. Relação entre os conteúdos de  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  nas amostras de água subterrânea e comparação com a recta meteórica mundial e recta meteórica obtida para a região do Baixo Vouga.

Em regiões de clima temperado como as estudadas, o efeito dominante das alterações climáticas é na posição da precipitação relativamente à recta meteórica local. Neste caso, as águas subterrâneas apesar de estarem isotopicamente empobrecidas relativamente à média ponderada da precipitação actual (cujos valores podem estar ligeiramente enriquecidos devido à evaporação), verifica-se um enriquecimento isotópico das águas subterrâneas com tempos de residência mais elevados relativamente às águas subterrâneas mais recentes. Este fenómeno é bem visível quando se projectam os resultados obtidos para os isótopos estáveis de oxigénio e deutério versus a percentagem de carbono moderno (Fig. 6), e já tinha sido observado em Portugal no sistema aquífero Cretácico de Aveiro (Carreira Paquete, 1998) localizado a norte dos sistemas aquíferos estudados.

Estas variações isotópicas estão provavelmente relacionadas com alterações climáticas na altura em que ocorreu a recarga da água subterrânea e podem ser interpretadas como o resultado destas águas mais antigas não serem parte de sistemas de fluxo subterrâneo activos (ou, pelo menos tão activos) na actualidade. Esta característica faz com que se possa considerar que estes sistemas aquíferos são menos vulneráveis a fenómenos de contaminação, mas por outro lado que apresentam recursos finitos e com taxas de renovação muito limitadas, pelo que necessitam de uma gestão integrada com outros recursos de água alternativa.

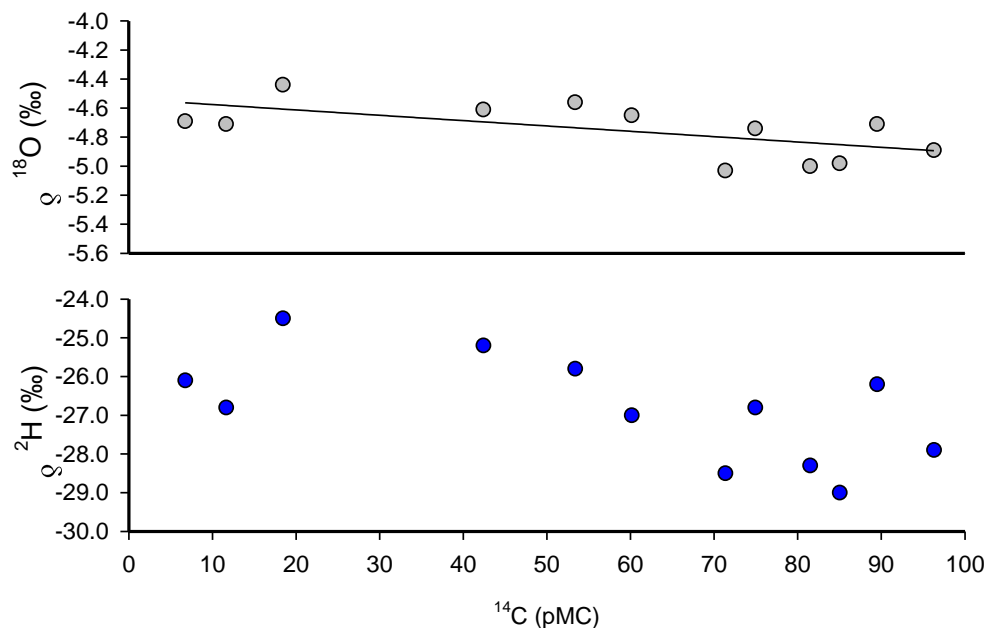


Figura 6. Comparação entre os conteúdos de  $\delta^{2}\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  nas amostras de água subterrânea e a percentagem de carbono moderno.

Os dados de carbono-13 obtidos confirmam que as águas mais antigas estarão a circular em sistema fechado ao  $\text{CO}_2$  (Fig. 7) e portanto sem contacto directo com a atmosfera, pelo que o enriquecimento observado em  $\delta^{13}\text{C}$  se deverá à mistura entre o  $\delta^{13}\text{C}$  do  $\text{CO}_2$  dissolvido durante os processos de infiltração (recarga subterrânea) e a calcite dissolvida na interacção água - aquífero.

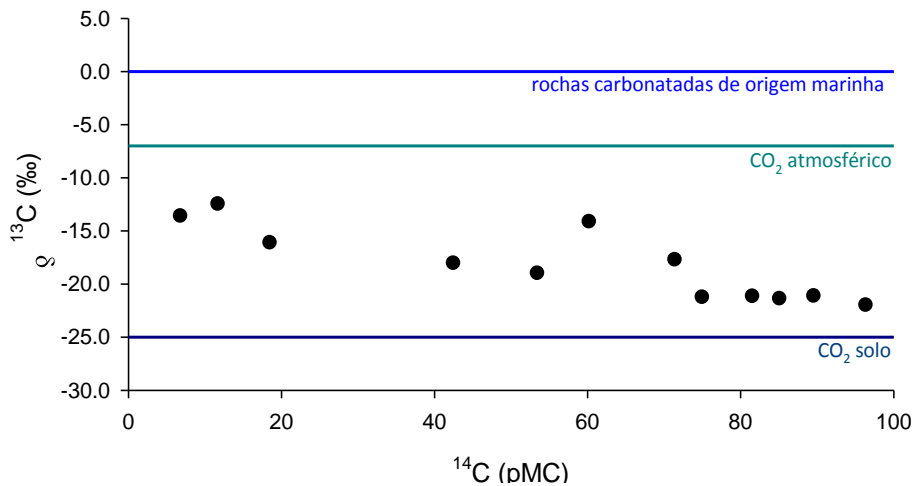


Figura 7. Evolução dos conteúdos de  $\delta^{13}\text{C}$  nas amostras de água subterrânea em função da percentagem de carbono moderno (pMC).

A representação dos conteúdos de carbono-13 relativamente aos valores de pH e bicarbonato, confirma que as amostras mais antigas (com valores mais elevados de  $\delta^{13}\text{C}$ ), apresentam concentrações mais elevadas de ião bicarbonato em solução e valores crescentes de pH (Fig. 8).

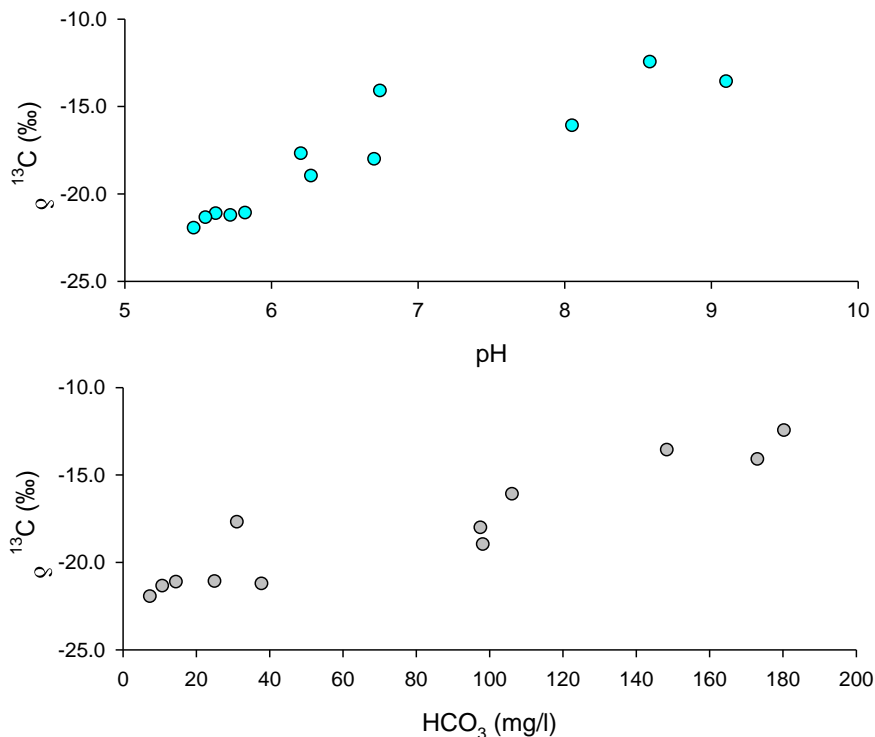


Figura 8. Relação entre os valores de pH, ião bicarbonato e o conteúdo em carbono-13 nas amostras de água subterrânea.

Isto deve-se ao facto de as águas subterrâneas ao circularem no aquífero e reagirem com os minerais silicatados e carbonatados consumirem  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}^+$ . Quando em sistema aberto (na zona de recarga, águas mais recentes) haverá possibilidade de repor o  $\text{CO}_2$  consumido pelos processos de interacção água - rocha, em sistema fechado (parte confinada dos sistemas aquíferos, águas mais antigas) o  $\text{CO}_2$  será gradualmente consumido até praticamente desaparecer.

A dissolução de calcite produz o aumento de bicarbonato em solução e é um dos processos geoquímicos mais relevante no controlo do pH da água subterrânea. Nos furos mais profundos e mais próximos da costa, a dissolução de calcite dá origem a valores elevados de pH ( $\text{pH} > 8,3$ ) e que poderão levar a que se atinja o estado de saturação (Fig. 8). Ao atingir a saturação a calcite precipita, reduzindo momentaneamente a concentração de bicarbonato e cálcio, até se atingir um novo equilíbrio.

#### 4.2 Isótopos radioactivos ( $^3\text{H}$ e $^{14}\text{C}$ )

Com base na análise dos resultados das análises de isótopos estáveis ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{13}\text{C}$ ) e radioisótopos ( $^3\text{H}$  e  $^{14}\text{C}$ ) obtidos para os diferentes sistemas aquíferos estudados, as águas subterrâneas poderão ser agrupadas em quatro grupos principais (Fig. 9):

- $A^{14}\text{C}$  (CITD)  $< 15$  pCM e  $\delta^{13}\text{C} = -12$  to  $-14$  ‰
- $A^{14}\text{C}$  (CITD)  $= 15 - 20$  pCM e  $\delta^{13}\text{C} = -14$  a  $-16$  ‰
- $A^{14}\text{C}$  (CITD)  $> 20 - 90$  pCM e  $\delta^{13}\text{C} < -16$  ‰ (com excepção da amostra 10, que apresenta  $\delta^{13}\text{C} = 14,09$  ‰)
- $A^{14}\text{C}$  (CITD)  $> 90$  pCM e  $\delta^{13}\text{C} < -21$  ‰

e, que correspondem a águas subterrâneas com idades aparentes representativas de paleoáguas (Pleistocénico tardio – Holocénico), águas muito antigas (Holocénico), águas antigas e águas modernas, respectivamente.

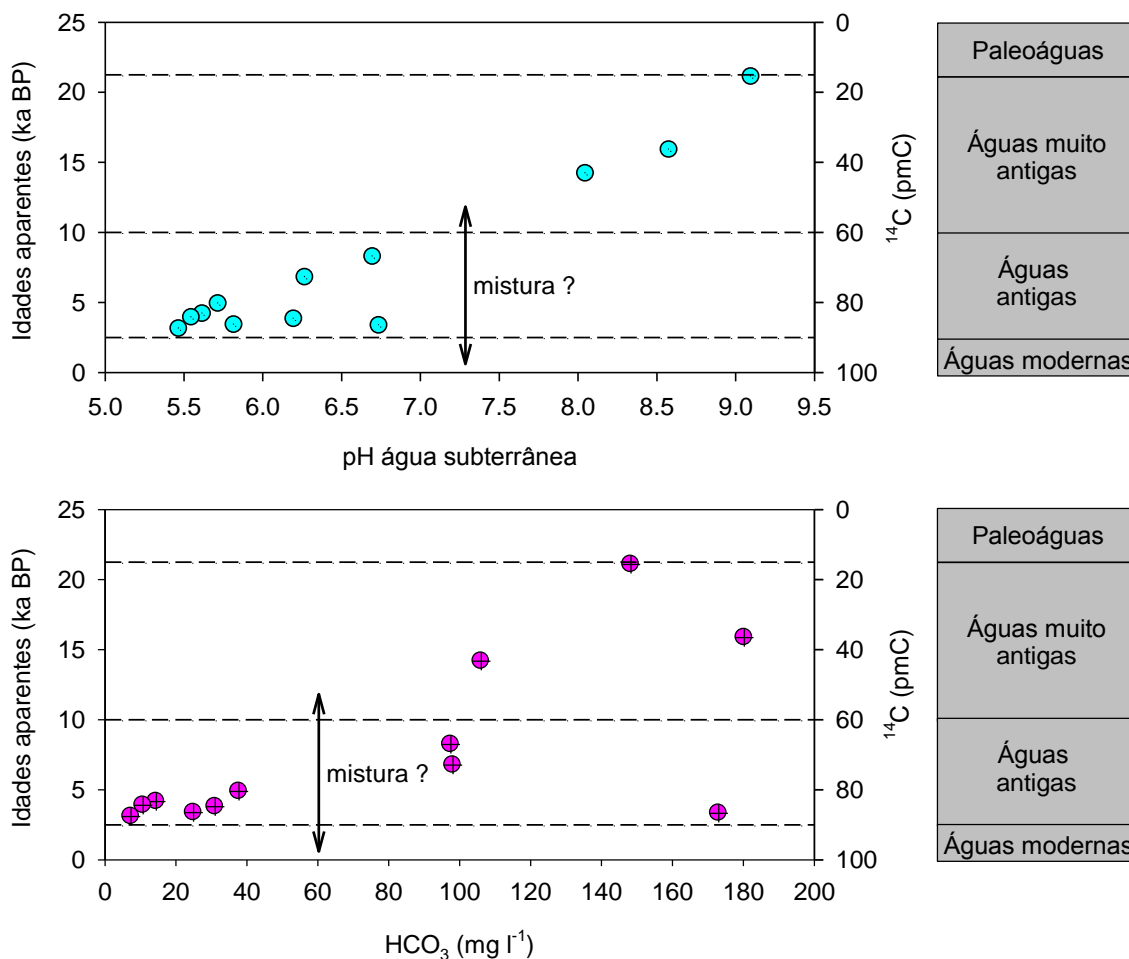


Figura 9. Evolução dos tempos de residência das águas subterrâneas estudadas.

As idades aparentes das águas subterrâneas foram calculadas a partir dos dados de  $^{14}\text{C}$  determinados e corrigidos com base no valor  $\delta^{13}\text{C}$  da amostra de água segundo o modelo sugerido pela Agência Internacional de Energia Atômica - IAEA (Salem *et al.*, 1980). Este modelo é baseado no balanço químico de Tamers (1975) com um factor de correcção devido às reacções secundárias de intercâmbio químico e isotópico entre a água subterrânea e a matriz carbonatada do solo/ aquífero. Este modelo foi seleccionado tendo em conta a composição química do aquífero, nomeadamente a subsaturação relativamente à calcite.

Os resultados foram comparados aos de outros modelos (e.g. Evans *et al.*, 1979) e aos que se obteriam sem qualquer correcção do efeito de diluição ou fraccionamento isotópico. Um valor de  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-25 \pm 1\text{‰}$  foi assumido para o  $\text{CO}_2$  solo assim como um valor de  $0 \pm 1.0\text{‰}$  para a matriz carbonatada, tendo-se considerado um factor de enriquecimento de  $8 \pm 0.5\text{‰}$  responsável pelo fraccionamento.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos de 13 furos profundos dos sistemas aquíferos Condeixa-Alfarelos, Leirosa - Monte Real, Vieira de Leiria - Marinha Grande e Pousos - Caranguejeira, confirmaram a existência de águas com elevados tempos de residência (algumas no limiar das paleoáguas com 22000 anos) e condições de recarga diferentes das actuais, pelo que podem constituir reservas estratégicas de água doce com um nível de vulnerabilidade relativamente baixo e uma capacidade de atenuação de contaminantes relativamente elevada.

## BIBLIOGRAFIA

APPELO and POSTMA - *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. AA Balkema, 1996.

CARREIRA PAQUETE, P.M.M. - *Paleoáguas de Aveiro*. PhD thesis, Universidade de Aveiro, Portugal, 1998, 377 pp.

EVANS, G.V.; OTLET, R.L.; DOWNING, R.A.; MONKHOUSE, R.A.; RAE, G. - *Some problems in the interpretation of isotope measurements in the United Kingdom aquifers*. *Isotope Hydrology 1978*, Vol.II, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1979, pp. 679-708.

SALEM, O.; VISSER, J.M.; DEAY, M.; GONFIANTINI, R. - *Groundwater flow patterns in the western Lybian Arab Jamahitiya evaluated from isotope data*, in *Arid Zone Hydrology: Investigations with Isotope Techniques*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1980, pp. 165-179.

TAMERS, M.A. - *Validity of radiocarbon dates on groundwater*. *Geophysical Survey*, 2, 1975, pp. 217-239.