

O sistema hidromineral de Caldas do Moledo, Peso da Régua (Norte de Portugal)

The hydromineral system of Caldas do Moledo, Peso da Régua (Northern Portugal)

ESPINHA MARQUES, J.¹; CARVALHO, J. M.² & BORGES, F. S.¹

Abstract

The results of studies concerning the geologic, geomorphologic, tectonic and hydrogeologic features of Caldas do Moledo (Peso da Régua, Northern Portugal) hydromineral system are presented. The geological and structural study included the survey of structural discontinuities and tectonic lineaments. A major granitic outcrop was identified and mapped (Cidadelhe granite). An hydrogeologic inventory was performed. The study of the hydrodynamic features of the discharge zone was carried out based on the results of several well flow tests. The hydrogeochemical characterisation included the major ion and the ¹⁸O, ²H, ³H and ¹⁴C contents. An hydrogeologic conceptual model concerning, mainly, the hydromineral circulation is proposed.

Key words: hydromineral system, geology, morphostructure, hydrogeology, hydrogeochemistry, Caldas do Moledo.

(1) Centro de Geologia da Universidade do Porto e Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Praça de Gomes Teixeira, 4099-002 Porto. Portugal. (jorgespinha@yahoo.com.br)

(2) Departamento de Geociências da Universidade de Évora, Apartado 94. 7001 Évora, Portugal, e Centro de Geologia da Universidade do Porto. (martinscarvalho@mail.telepac.pt)

INTRODUÇÃO

O presente trabalho teve como principal objectivo caracterizar o sistema hidromineral de Caldas do Moledo (Peso da Régua, Norte de Portugal), através de uma abordagem que considerou a sua geologia, geomorfologia, tectónica, hidrogeologia, geomorfologia, tectónica, hidrogeologia, química e hidrogeologia. Por outro lado, pretendeu-se contribuir para a criação de condições que possibilitassem a valorização do recurso hidromineral.

Os estudos foram conduzidos fazendo uso de um ponto de vista multidisciplinar, tendo sido privilegiada uma abordagem generalista, em detrimento de uma perspectiva de especialidade.

Os referidos estudos permitiram desenvolver um modelo hidrogeológico conceptual que sintetiza, de acordo com os conhecimentos actualmente disponíveis, os processos naturais intervenientes no sistema hidromineral de Caldas do Moledo.

A importância da realização destes estudos resulta da necessidade de se fundamentar a exploração dos recursos hidrominerais e geotérmicos (de baixa entalpia, no caso de Caldas do Moledo) em informação científico-tecnológica suficiente para se garantir uma utilização ambientalmente sustentável e economicamente racional dos mesmos. Com efeito, o estudo deste sistema hidromineral permitiu proceder à delimitação do perímetro de protecção das captações de água mineral de Caldas do Moledo. Esta necessidade é reforçada pelo facto de muitos dos sistemas hidrominerais existentes em Portugal poderem contribuir de forma considerável para o desenvolvimento sócio-económico regional.

É de referir, por último, que os resultados apresentados têm como base o trabalho de síntese apresentado por ESPINHA MARQUES (2001).

ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO

A área estudada localiza-se na Zona Centro Ibérica do Terreno Autóctone Ibérico (RIBEIRO *et al.*, 1990) — figura 1. Diversos estudos regionais (*e.g.* CHOFAT, 1917; CARVALHO, 1993, 1996; BAPTISTA, 1998; PILAR & FERNANDES, 1962; CABRAL, 1995; ESPINHA MARQUES *et al.*, 2001a) identificam as principais estruturas tectónicas presentes na região: a falha de Régua-Verin (também designada por falha de Penacova-Régua-Verin, orientada segundo NNE-SSW) e a zona de cisalhamento de Vigo-Régua (também designada por Vigo-Vila Nova de Cerveira-Régua, orientada segundo WNW-ESE). Por outro lado, a existência de uma estrutura tectónica neste sector do vale do rio Douro (figura 1) tem sido referida por diversos autores (*e.g.* SEIFERT, 1967, 1969; SEIFERT & VICENTE, 1968; CARVALHO & SILVA, 1988). Estes estudos apontam para a ocorrência de um controlo tectónico e geomorfológico dos sistemas hidrominerais localizados ao longo da falha de Régua-Verin. Segundo BAPTISTA *et al.* (1998), as características morfoestruturais são preponderantes para a explicação da génese das ocorrências hidrominerais, devido à criação de zonas de maior permeabilidade por fracturação. CALADO & ALMEIDA (1993) e MARQUES *et al.* (1998) colocam, mesmo, a hipótese de haver contribuição de fluidos profundos nestas águas.

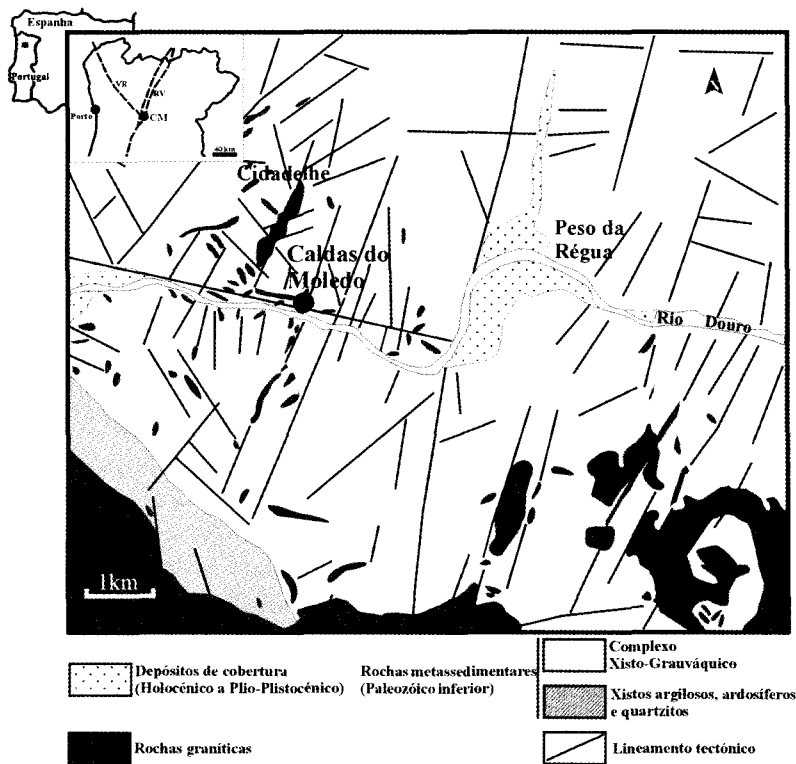


Figura 1. Esboço geológico-estrutural da região de Caldas do Moledo, Peso da Régua (adaptado de ESPINHA MARQUES *et al.*, 2001a; base neotectónica de CABRAL & RIBEIRO, 1988).

As formas de relevo associadas ao vale do rio Douro constituem a principal característica geomorfológica da região envolvente de Caldas do Moledo (Peso da Régua, N de Portugal). Este vale é delimitado, a norte, pelos cumes de natureza xisto-quartzítica da serra do Marão e, a sul, pela serra das Meadas. Os relevos de maior interesse para o sistema hidromineral de Caldas do Moledo são os da margem norte do rio Douro, os quais culminam no ponto que coincide com o vértice geodésico do Marão (1415 m). Na região envol-

vente de Caldas do Moledo, o vale do Douro é encaixado, excepto na zona do Peso da Régua, onde se torna mais amplo.

Assim, nas imediações de Caldas do Moledo, o vale do rio Douro é caracterizado por desníveis importantes entre o leito do rio (*ca.* 50 m de altitude) e os cumes adjacentes, dos quais se destacam os que correspondem aos *v.g.* de Santa Sabina (443 m), de Mesquitela (729 m) e de Rojão (886 m). A rede de drenagem apresenta, amiúde, sinais de controlo tectónico: troços de linhas de água rectilíneas,

com inflexões súbitas, e paralelismos entre conjuntos de linhas de água (ESPINHA MARQUES *et al.* 2001a, *in press*; ESPINHA MARQUES, 2001).

Verifica-se, ainda, que as linhas de água são, com frequência, paralelas ao alinhamento da falha de Penacova-Régua-Verín, facto particularmente evidente no segmento final do rio Corgo, na ribeira da Meia-Légua e em certos segmentos da ribeira da Seromenha. As encostas junto do rio Douro e de alguns dos afluentes tendem a ser bastante inclinadas (por vezes > 40°) — ESPINHA MARQUES (2001). A figura 2 representa a geomorfologia da área estudada, com base num modelo digital do terreno (MDT). ESPINHA MARQUES *et al.* (*in press*) apresentam informação adicional e pormenorizada sobre a morfoestrutura desta região.

Nas regiões envolvente de Caldas do Moledo (figura 1) ocorrem, fundamentalmente, rochas metassedimentares de natureza turbidítica, de idade câmbria inferior, enquadradas no Complexo Xisto-Grauváquico do Grupo do Douro (BERNARDO DE SOUSA, 1982, 1983; BERNARDO DE SOUSA & SEQUEIRA, 1989).

Nas imediações de Caldas do Moledo, os metassedimentos constam de metapelitos de cor cinzenta clara a escura, alternando com níveis metapsamíticos esbranquiçados, exibindo o conjunto um aspecto listrado. Identificaram-se, também, níveis de rochas calcossilicatadas. A unidade metapelítica apresenta-se, em regra, como um conjunto muito homogéneo, monótono e exibindo uma fissilidade muito acentuada. São frequentes na região corpos aplitopegmatíticos e/ou pegmatíticos.

O estudo petrográfico destes metapelitos permitiu constatar que são rochas bastante ricas em quartzo e com uma percentagem apreciável em filossilicatos, o que sugere que os respectivos protólitos possam ser considerados como quartzovaques e/ou grauvaques. Assim, a mineralogia, observada em lâmina delgada, inclui essencialmente quartzo, biotite, moscovite, clorite e, acessoriamente, destacam-se a cordierite, a clinozoizite, o rútilo, a turmalina, a apatite, o zircão, o epidoto e óxidos diversos (ESPINHA MARQUES, 2001; ESPINHA MARQUES *et al.*, 2001b).

Os estudos realizados permitiram identificar um afloramento granítico cartografável, situado ao longo do vale da ribeira da Seromenha (junto da localidade de Cidadelhe), ao longo de *ca.* 1500 m, com largura que chega a atingir 200 m (ESPINHA MARQUES, 2001; ESPINHA MARQUES *et al.*, 2001a, b, *in press*). Estão em curso estudos geotectónicos, geomorfológicos, geoquímicos e geocronológicos de pormenor sobre o granitóide de Cidadelhe e massas aplitopegmatíticas envolventes, cuja presença, de resto, não se encontra assinalada na cartografia geológica publicada (FERNANDES, 1944; TEIXEIRA *et al.*, 1967).

O estudo da tectónica regional abordou, em particular, os aspectos relacionados com a fracturação, tendo em vista obter um melhor conhecimento sobre a compartimentação do maciço rochoso e, como consequência, uma melhor compreensão da circulação das águas subterrâneas. Procedeu-se, então, a um levantamento estrutural das principais discontinuidades (*e.g.*, estratificação, xistosidade, diáclases e falhas). Verificou-se que as superfícies de

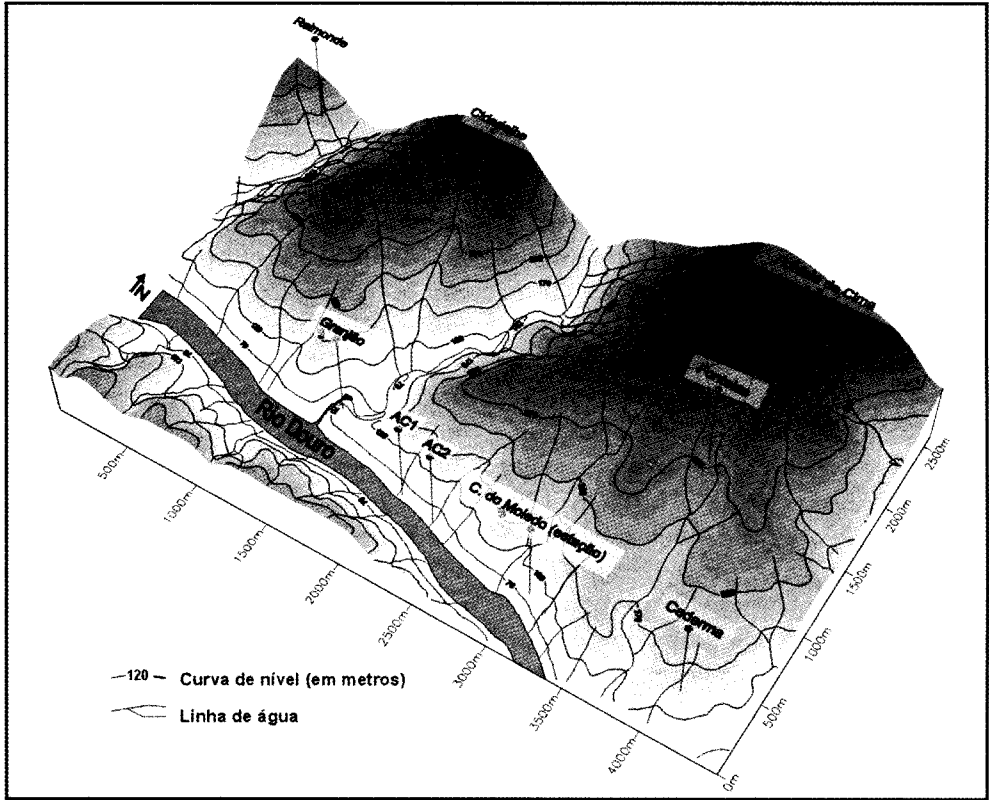


Figura 2. Geomorfologia da região envolvente das Termas de Caldas do Moledo (Oeste de Peso da Régua).

estratificação têm, em geral, inclinação inferior a 20° e uma direcção variável. A xistosidade regional apresenta, quase sempre, uma atitude sub-paralela à da estratificação. O diaclasamento no Complexo Xisto-Grauváquico é, predominantemente, perpendicular à xistosidade regional. As fendas de tracção, normalmente preenchidas por quartzo, são relativamente comuns nas bancadas metagrauváquicas.

Com base na fotografia aérea, na topografia e no MDT foi possível reconhecer os principais lineamentos estruturais regionais. Efectuou-se, também, um levanta-

mento em diversos taludes e afloramentos das atitudes de diáclases e falhas através da técnica de amostragem linear (*e.g.* CHAMINÉ & GASPARGAS, 1995). Estas descontinuidades definem uma família principal de direcção N0°E a N30°E; regista-se ainda a existência de uma outra família, com menor número de observações, com orientação média N135°E a N150°E.

Os estudos realizados incluíram trabalhos de geofísica (ACAVACO, 1988) os quais constaram de um levantamento geoelectrico composto por dois perfis segundo o dispositivo do rectângulo, com AB de

1200 m e MN de 20 m, com leituras de 5 em 5 m, e por sondagens verticais do tipo 'Schlumberger' com AB/2 até 250 m. Os perfis tiveram orientação E-W e situaram-se entre a zona do balneário e a zona das piscinas do rio das Termas das Caldas do Moledo. Foram identificadas duas anomalias de baixa resistividade, situadas em cada extremo dos perfis (ACAVACO, 1988). A orientação geral destas anomalias sugere que estas poderão estar associadas a zonas intensamente fracturadas, de direcção geral NNE-SSW a NE-SW, correspondendo, possivelmente, a estruturas tectónicas.

CLIMATOLOGIA

A região de Caldas do Moledo está geograficamente posicionada num local onde se verifica uma variação brusca de precipitação entre o litoral e o interior do Norte de Portugal, a qual se deve à presença de barreiras orográficas (O. RIBEIRO *et al.*, 1994; ESPINHA MARQUES, 2001).

De acordo com as províncias climáticas definidas por O. RIBEIRO *et al.* (1994), esta região enquadra-se no Norte de Portugal, Região Continental e Província do Alto Douro. Esta província corresponde ao vale e Bacia do Alto Douro até à altitude aproximada de 600m. É a chamada Terra Quente, caracterizada por um Verão longo e muito quente e um Inverno suave e curto (O. RIBEIRO *et al.*, 1994). A precipitação é, regra geral, fraca (500mm, em média). O período de estiagem é, no mínimo, de três meses.

Procedeu-se ao cálculo do balanço hidrológico ao nível do solo pelo método de Thornthwaite com dados de MENDES & BETTENCOURT (1980) relativos às esta-

ções climatológicas do Peso da Régua (para o período entre 1937 e 1970) e de Mesão Frio (para o período entre 1940 e 1960).

No caso da estação do Peso da Régua (situada a cerca de 5km a nascente de Caldas do Moledo), verificou-se que a precipitação anual média no período considerado (854mm) é superior à das restantes estações climatológicas desta província climática. Este facto deve-se, provavelmente, à menor distância desta estação ao litoral e ao seu posicionamento face aos relevos que funcionam como barreira de condensação. A precipitação concentra-se nos meses entre Outubro e Abril (83% do total do ano médio). Neste período, com excepção do mês de Outubro, as temperaturas são inferiores à média anual (15,5°C). De acordo com os resultados obtidos, ocorre défice hídrico entre Julho e Setembro, e superavit hídrico entre Dezembro e Abril.

Na estação climatológica de Mesão Frio (situada a cerca de 4,5 km a WNW de Caldas do Moledo) a precipitação anual média (1045mm) é mais elevada do que no Peso da Régua. A temperatura média anual, pelo contrário, é inferior (14,1°C). O período mais chuvoso inclui os meses entre Outubro e Maio, com cerca de 89% da precipitação do ano médio. Existe défice hídrico entre Julho e Setembro e superavit hídrico entre Dezembro e Abril. Este conjunto de características permite apresentar o clima de Mesão Frio como sendo característico da transição entre a Região Marítima e a Região Continental (definidas por O. RIBEIRO *et al.*, 1994).

É de notar que a estação de Peso da Régua tem uma altitude de 65m — mais próxima da altitude da zona de descarga do sistema hidromineral — enquanto a

estação de Mesão Frio se localiza a uma altitude de 300m, mais próxima da altitude da possível zona de recarga do sistema hidromineral.

Os cálculos realizados permitem, ainda, inferir a existência de excedentes hídricos apreciáveis: cerca de 375mm/ano no Peso da Régua e 493mm/ano em Mesão Frio. Não se conhece com rigor qual a fracção destes excedentes que corresponde à recarga dos aquíferos. PEREIRA (1999) calculou um valor de 20% da precipitação média anual para a recarga subterrânea na bacia do Tua; LIMA (1994) estimou valores de recarga situados entre 14,6 e 21,7% para a região de Braga. ALENCOÃO *et al.* (2000), por seu lado, propõem valores de recarga, na bacia do rio Corgo, que variam entre 5 e 10% da precipitação média anual. CARVALHO *et al.* (2000), referindo-se a estudos realizados a propósito dos planos de bacia hidrográfica dos rios Lima, Cávado, Ave, Leça e Douro, propõem valores médios de recarga de 14 a 17% para as formações cristalinas do Norte de Portugal, mas chamam a atenção para a ocorrência de importantes variações locais.

HIDRODINÂMICA DA ÁREA DE DESCARGA

Nestes estudos, considerou-se que os aquíferos de águas normais são os mais superficiais, contendo principalmente águas de infiltração e circulação local, com tempos de residência curtos. Estes aquíferos podem ser livres ou confinados. Por outro lado, considerou-se que o aquífero hidromineral se caracteriza por um circuito hidrogeológico com águas de infiltração distante e trajecto longo e profundo, com

tempos de residência igualmente longos. Este aquífero é confinado.

O inventário hidrogeológico (figura 3) considerou os seguintes pontos de água:

- i) furos activos: AC1 e AC2;
- ii) furos abandonados: TD1 e TD2;
- iii) minas com produção de água mineral: Lameira 28, Lameira 30, Fresca, Velha, Nova;
- iv) mina com água subterrânea normal: Outeiro (ou Superior);
- iv) nascentes: Parque, Poço Quente, Grupo do Rio (composto por 6 nascentes submersas).

CARVALHO (1993) verificou que, no estudo da hidrodinâmica dos aquíferos hidrominerais portugueses localizados no Maciço Varisco, é possível utilizar a aproximação de Cooper-Jacob assim como o método da recuperação de Theis, considerando estes aquíferos como confinados. Para aquelas ocorrências hidrominerais, o mesmo autor calculou transmissividades (T) entre 0,2 e 160m²/dia; verificou, ainda, que cerca de metade desses valores se situam entre 10 e 60m²/dia. Para o caso de Caldas do Moledo, o cálculo da T no furo AC2 conduziu ao valor de 12m²/dia.

Durante os ensaios finais de caudal realizados em 1988, após a construção das captações AC1 e AC2 (com 112,0m e 99,5m de profundidade, respectivamente), foram recolhidas diversas informações de natureza hidrodinâmica (ACAVACO, 1988), as quais podem ser sintetizadas do seguinte modo:

- i) nível hidrostático idêntico para ambos os furos (+44m, referido à superfície topográfica);
- ii) no decurso dos ensaios de caudal, o furo AC1 interferiu com as minas Lameira

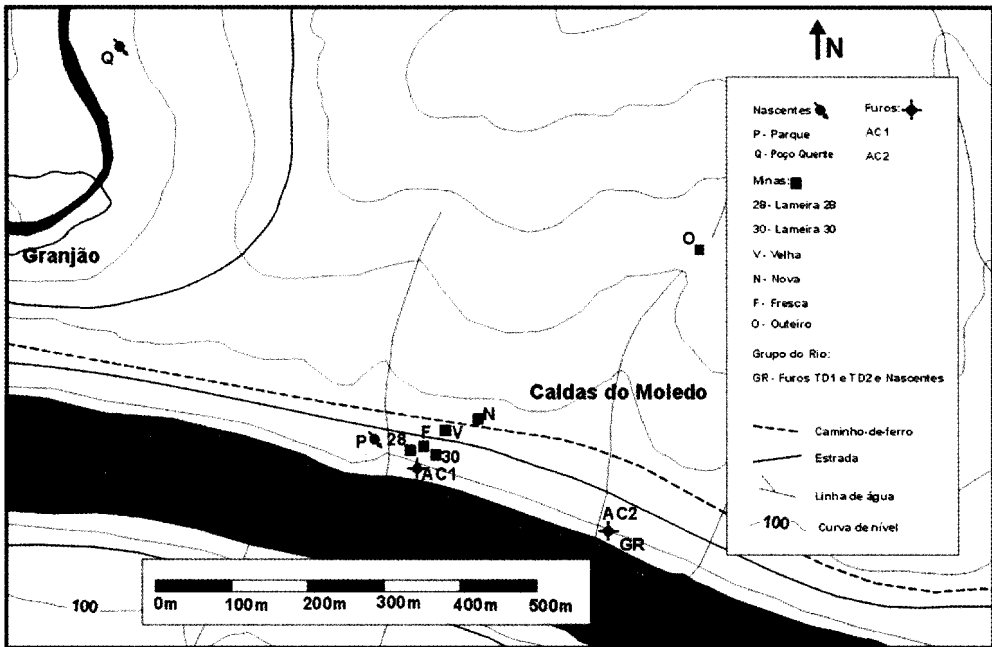


Figura 3. Localização dos pontos de água inventariados (adaptado de ESPINHA MARQUES, 2001).

28 e Lameira 30, secando-as completamente, mas não afectou a Mina Velha, a Mina Nova, a Bica do Parque ou o furo AC2 (figura 3);

iii) por sua vez, o ensaio no furo AC2 provocou interferências com os furos TD1 e TD2, os quais deixaram de manifestar artesianismo repuxante, mas não afectou o furo AC1;

iv) a utilização dos furos AC1 e AC2 como piezómetros não permitiu registar qualquer interferência resultante da extracção, o que impossibilitou o cálculo do coeficiente de armazenamento;

v) durante a perfuração do furo AC1, a água revelou carácter claramente termomineral (água do tipo “Moledo”) a partir dos 40m de profundidade, apresentando, já aos 10m, bastantes semelhanças químicas

com a água das minas Lameira 28 e Lameira 30; no furo AC2, apenas a partir dos 60m de profundidade a água se revelou como sendo do tipo “Moledo”, apesar de, a partir dos 20m, já estarem presentes algumas características físico-químicas das águas minerais; as profundidades de 40m e de 60m referidas podem ser tomadas como estimativas da espessura da camada confinante do aquífero hidromineral nos locais das respectivas sondagens.

A tabela 1 apresenta os valores dos níveis hidrostáticos e hidrodinâmicos, assim como dos caudais extraídos. Os caudais foram extraídos através do artesianismo das captações e os níveis foram medidos com manómetros. O ensaio com caudal de 12,2l/s do furo AC2 constituiu excepção, pois foi executado com auxílio

de bomba submersível, tendo os níveis sido medidos com sonda eléctrica.

Em 1999, foram efectuados ensaios de caudal adicionais dois dos quais foram interpretados utilizando o método de recuperação de Theis e a aplicação informática Aqtesolv® (ESPINHA MARQUES, 2001). Estes ensaios foram realizados através do artesianismo das captações, não tendo havido bombagem. Os ensaios de recuperação foram antecidos por um período de extracção de 8h (no caso do furo AC1) e de 6h (no caso do furo AC2).

Foram calculados valores de T de $4\text{m}^2/\text{dia}$ (no caso do furo AC1) e de $12\text{m}^2/\text{dia}$ (no caso do furo AC2). O valor do furo AC2 coincide perfeitamente com aquele apresentado por CARVALHO (1993).

Da mesma forma, durante os ensaios de 1999 não foram observadas influências do furo AC1 sobre o AC2 e vice-versa. Crê-se que as influências entre os furos exigiriam tempos de extracção substancialmente

superiores para serem detectadas. No que respeita às influências da extracção dos furos sobre outras captações, as observações dos ensaios de caudal mais recentes (1999) coincidiram perfeitamente com as dos ensaios mais antigos (1988).

Tal como em 1988, verificou-se que o furo AC2 apresenta rebaixamentos menores do que o furo AC1 para caudais extraídos equivalentes, ou seja, o furo AC2 apresenta caudais específicos (Q_e) superiores. Verifica-se, assim, que ao furo AC2 correspondem valores mais elevados de Q_e e de T. Os resultados do estudo geoelectrico permitem, ainda, verificar que foi na zona de implantação daquele furo que se mediu a anomalia geoelectrica mais intensa. Perante estes resultados coloca-se a hipótese de, na zona oriental do parque das termas, existir, em profundidade, uma faixa de fracturação mais larga e com maior condutividade hidráulica.

Captação	AC1			AC2		
Nível Hidrostático (m)*	+44,0			+44,0		
Nível Hidrodinâmico (m)*	+35,0	0,0	-25,0	+35,0	0,0	-25,0
Caudal extraído (l/s)	4,25	9,0	12,2	4,25	9,0	12,2
Caudais de exploração recomendados	4l/s (14 400l/h)			6l/s (21 600l/h)		

(*) níveis referidos à superfície topográfica

Tabela 1. Resultado dos ensaios de caudal nos furos AC1 e AC2 em Março de 1988.

Foi possível estimar a condutividade hidráulica (K) a partir da expressão:

$T = K \times e$ (e : espessura do aquífero confinado)

Admitiu-se, neste caso, que o valor de e , em cada furo, corresponde ao comprimento entre o extremo superior do tubo ralo mais superficial e o extremo inferior do tubo ralo mais profundo. Este comprimento corresponde, aproximadamente, à diferença de cotas entre o ponto da captação em que se deu o aparecimento de água com características físico-químicas do tipo "Moledo" e o extremo inferior das captações. Sendo assim, aceitaram-se valores de 63,0m para o furo AC1 e de 30,0m para o furo AC2.

Por seu lado, o coeficiente de armazenamento foi inferido com recurso à aproximação proposta por LOHMAN (1972):

$$S \cong 3 \times 10^{-6} \times e$$

Os resultados obtidos são sintetizados na tabela 2.

Comparando os níveis hidrostáticos de 1988 (+44m, referido à superfície topográfica) com os níveis de 1999 (+38m para o furo AC1 e +36m para o furo AC2) verifica-se que a superfície potenciométrica aparenta ter sofrido um rebaixamento que

poderá ser devido a cerca de 11 anos de exploração contínua do aquífero hidromineral.

ESTUDO HIDROGEOQUÍMICO

Sob o ponto de vista químico, as águas minerais de Caldas do Moledo enquadram-se no conjunto das águas sulfúreas portuguesas (CANTO MACHADO, 1988), cuja maioria se encontra a norte do rio Mondego.

A mesma autora identifica as principais características químicas daquele conjunto de águas: i) pH superior a 7; ii) concentração de sílica superior a 10% da mineralização total; iii) concentração de fluoreto superior a 5mg/l; iv) existência de formas reduzidas de enxofre (sulfidrato e tiosulfato) e v) presença de sódio como catião dominante.

Apresenta-se, ainda, um quadro comparativo de resultados correspondentes a análises realizadas no Laboratório de Mineralogia e Petrologia do Instituto Superior Técnico, LAMPIS, (tabela 3) e a respectiva representação num diagrama de Piper (figura 4), relativos à maior parte dos pontos de água identificados na área em estudo (ESPINHA MARQUES, 2001; MARQUES *et al.*, 1998, 2000, 2003).

Captação	T (m ² /dia)	K (m/dia)	S
AC1	4	5,8x10 ⁻²	1,9x10 ⁻⁴
AC2	12	4,0x10 ⁻¹	9,0x10 ⁻⁵

Tabela 2. Parâmetros hidrodinâmicos calculados a partir dos ensaios de caudal de 1999.

Captação	Temperatura (°C)	pH	Condutividade (µS/cm)	Mineralização Total (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	HCO ³ (mg/l)	CO ³ (mg/l)	Cl (mg/l)	F (mg/l)	NO ³ (mg/l)	SO ⁴ (mg/l)	SiO ² (mg/l)
AC1	46,0	9,2	339	231,2	75,0	1,0	2,4	n.d.	76,8	5,9	19,0	19,5	n.d.	10,1	47,9
AC2	42,3	9,0	330	238,8	73,0	1,1	2,6	n.d.	79,9	6,1	19,8	18,3	n.d.	9,4	50,9
Lameira 28	35,0	9,4	318	261,7	72,9	1,4	2,2	0,5	71,9	8,8	21,5	17,5	0,1	4,3	34,8
Lameira 30	41,2	9,0	345	261,3	75,0	1,0	2,4	n.d.	75,0	5,3	18,4	18,7	n.d.	16,4	49,0
Mina Nova	28,1	8,6	350	265,2	67,8	1,7	14,7	3,7	90,5	0,5	19,5	n.a.	n.a.	23,4	43,4
Mina Fresca	27,6	8,0	451	334,9	70,0	2,3	19,0	4,4	86,0	0,6	20,8	15,0	0,3	69,5	47,1
Bica do Parque	19,1	7,4	391	299,3	49,0	2,6	20,2	3,5	108,1	0,2	21,0	7,9	0,4	43,0	43,4
Mina de Outeiro	16,4	7,7	365	282,4	31,0	2,9	34,4	0,5	82,8	0,2	27,1	4,0	5,2	63,9	30,4
Poço Quente	22,9	6,7	341	261,8	43,0	2,7	19,8	3,5	68,4	n.d.	24,4	4,7	8,1	45,1	42,2
Rio Douro	14,3	7,9	497	362,0	19,8	5,3	62,3	12,0	144,9	0,5	27,7	n.d.	10,3	77,9	1,5

(n.d.: não detectado; n.a.: não analisado)

Tabela 3. Concentrações iónicas e alguns parâmetros físico-químicos das águas de Caldas do Moledo.

As águas da região de Caldas do Moledo foram, igualmente, alvo de estudos isotópicos, os quais consideraram isótopos de oxigénio (^{18}O), de hidrogénio (^2H , e ^3H) e de carbono (^{14}C) — *e.g.* MARQUES *et al.* (1998, 2003).

Verificou-se que os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^2\text{H}$ das águas do sistema hidrogeológico de Caldas do Moledo — assim como de dois sistemas hidrominerais geograficamente próximos e com características hidrogeoquímicas semelhantes (Carlão e S.Lourenço) — se projectam sobre a recta das águas meteóricas mundiais ($\delta^2\text{H} = 8\delta\text{O}^{18} + 10$). Esta projecção indica que se

trata de águas meteóricas e que não existem indícios de interacção água-rocha a temperaturas elevadas.

Por outro lado, a variabilidade temporal da composição isotópica das águas, tendo um papel fulcral para a identificação da recarga recente, é indicada pela presença de ^3H nos sistemas hidrogeológicos. As águas termominerais de Caldas do Moledo (tal como as de Carlão e de S. Lourenço) são praticamente desprovidas de ^3H , o que aponta para períodos longos de residência em profundidade. As águas da Mina Nova, pelo contrário, apresentam valores de ^3H que devem resultar da mistura com águas

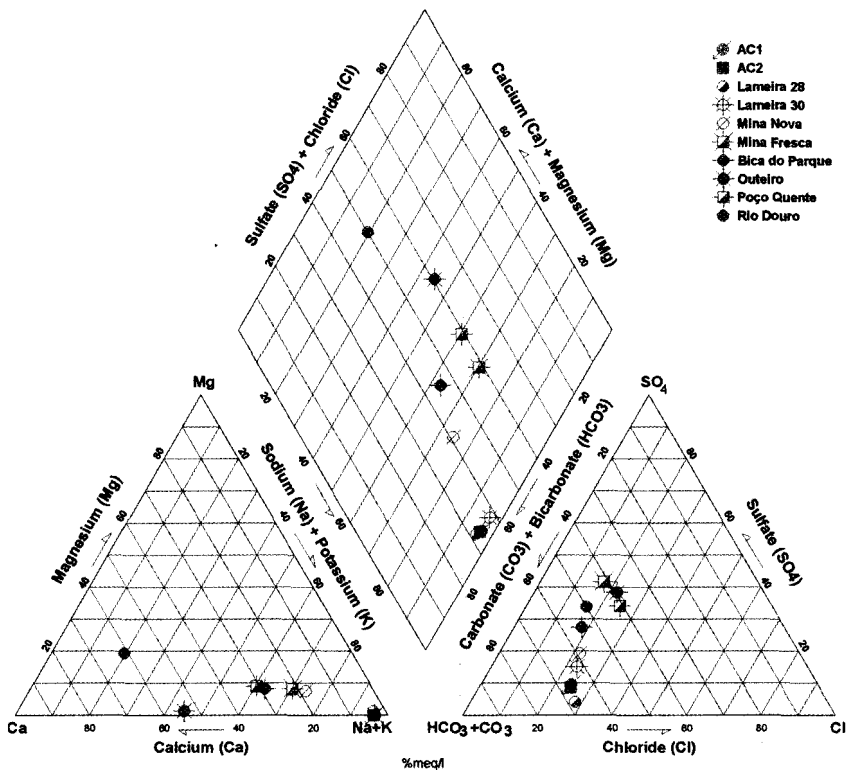


Figura 4. Diagrama de Piper das águas de Caldas do Moledo.

de circulação e infiltração local, apresentando tempos de residência em meio sub-superficial mais reduzidos (águas subterrâneas normais).

Estudos isotópicos apresentados por MARQUES *et al.* (2000, 2003), apontam para altitudes de recarga semelhantes no que respeita às águas de Caldas do Moledo, Carlão e S. Lourenço: entre 850 e 1000m .

Foi efectuada, através do método do ^{14}C , a datação isotópica de uma amostra de água recolhida no furo AC1. O resultado obtido indicou uma idade aparente de $15,66 \pm 2,86\text{ka}$ (MARQUES *et al.*, 2003). Esta idade aparente forneceu uma indicação acerca do momento da infiltração da água. Este resultado, sendo concordante com a inexistência de ^3H nas águas minerais, reforça a ideia de que o circuito hidromineral é bastante longo.

Os resultados hidrogeoquímicos obtidos permitiram individualizar diversos conjuntos de águas:

i. **Furos AC1 e AC2, Lameiras 28 e 30:** conjunto formado pelas águas mais representativas do aquífero hidromineral. Os dados de origem hidrogeoquímica, e hidrodinâmica apontam para uma circulação profunda e para uma reduzida ou nula mistura com águas normais. Trata-se de águas bicarbonatadas sódicas, com pH próximo de 9,00 e temperaturas de emergência situadas entre 35,0 e 45,7°C.

ii. **Minas Nova e Fresca e Bica do Parque:** as suas características hidrogeoquímicas sugerem a possibilidade de estas estarem envolvidas em fenómenos de mistura entre águas minerais e águas subterrâneas normais. As águas da Mina Fresca e da Bica do Parque são as que apresentam características mais próximas das águas

normais, nomeadamente no que respeita à temperatura, pH, e concentração de NO_3^- e SO_4^{2-} . No seu conjunto, são águas com pH situado entre 7,43 e 8,62 e temperaturas entre 19,1 e 28,1°C. As águas da Mina Nova e da Bica do Parque são bicarbonatadas sódicas, ao passo que a água da Mina Fresca é bicarbonatada/sulfatada-sódica.

iii. **Mina de Outeiro (ou Superior):** considerou-se esta água como sendo a mais representativa das águas subterrâneas normais devido às suas características químicas e ao posicionamento espacial do respectivo ponto de água no sistema hidromineral. A água da Mina de Outeiro distingue-se das águas do conjunto (i), entre outros aspectos, pela temperatura consideravelmente inferior (16,4°C), a qual é semelhante à das águas normais da região. Estas águas são igualmente caracterizadas pelo valor de pH mais ácido (7,74), pelo teor mais elevado em nitrato, sulfato, potássio, bicarbonato, cálcio e magnésio e pelo teor mais reduzido em sódio e carbonato. É uma água bicarbonatada/sulfatada-cálcica.

iv. **Nascente do Poço Quente:** esta apresenta características hidrogeoquímicas em parte comparáveis às da Mina Fresca (vide ESPINHA MARQUES *et al.*, *in press*).

UM MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL

Os resultados fornecidos pelo estudo morfoestrutural e pelo estudo isotópico possibilitaram esboçar os limites de uma área de recarga situada entre 5,5 e 8,5km para NW e WNW da área de descarga, cujas altitudes variam entre os 850m e os 1000m (ESPINHA MARQUES, 2001)

— figura 5. Por outro lado, a datação isotópica da água mineral referida aponta para um desfaseamento de vários milhares de anos entre a recarga e a descarga do sistema hidromineral.

O modelo conceptual proposto atribui um papel fundamental ao cisalhamento Vigo-Régua, de orientação WNW-ESE — no qual deverá ocorrer a maior parte da recarga e a fase inicial do fluxo hidromineral. Uma parte menos importante da recarga poderá, ainda, ocorrer nas imediações do vértice geodésico de Rojão (figura 5).

O volume de rocha fracturada associado àquele cisalhamento deverá ser responsável por uma parte do armazenamento profundo; outra parte desse armazenamento dever-se-á ao ramo da Falha de Régua-Verin que intersecta o alinhamento estrutural Vigo-Régua. O fluxo hidromineral entre as áreas de recarga e de descarga, tal como se propõe neste modelo, é esquematizado na figura 5.

Os estudos sobre a neotectónica regional, os trabalhos de geofísica e, ainda, o estudo da fracturação local, indicam as fracturas com orientação NNE-SSW a NE-SW como sendo as principais responsáveis pelo controlo estrutural da circulação na zona de descarga, assim como pelo transporte dos fluidos até à superfície. A este respeito dever-se-á, ainda, ter em conta a existência de descontinuidades de orientação E-W, paralelas à falha do Douro. A figura 6 apresenta um esquema da circulação hídrica subterrânea na zona de Caldas do Moledo.

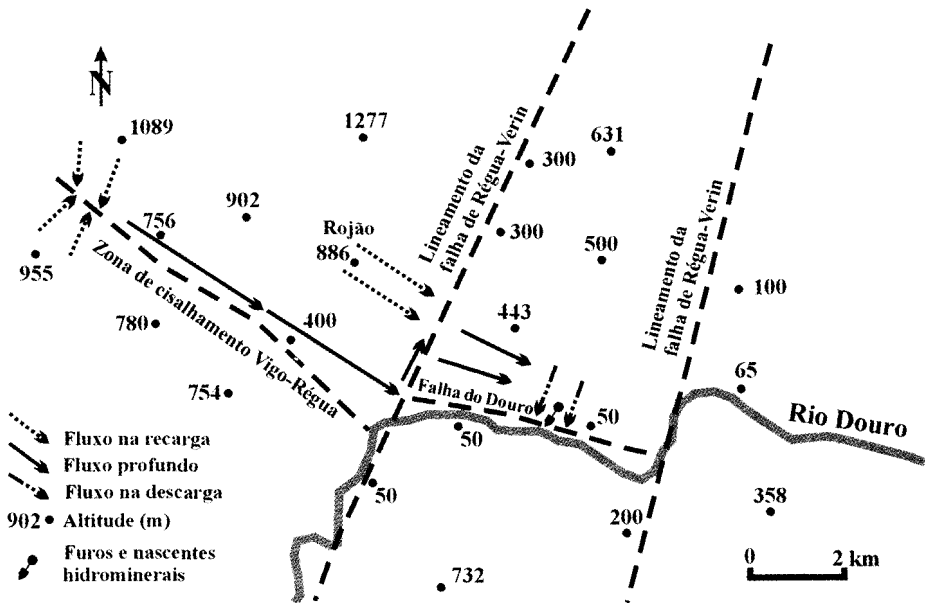


Figura 5. Tentativa de conceptualização do modelo de fluxo do sistema hidromineral de Caldas do Moledo.

De acordo com esse esquema, na zona envolvente das captações AC1 e AC2 o sistema hidromineral é composto por três aquíferos interrelacionados: i) um aquífero mais superficial, livre e com circulação de águas normais, ii) um aquífero de profundidade intermédia, confinado e, igualmente, com circulação de águas normais e, iii) o aquífero mais profundo, confinado e com circulação de águas minerais (ESPINHA MARQUES, 2001).

A circulação hidromineral mais superficial nas zonas de recarga e descarga oco-

re, principalmente, através de rochas metassedimentares e, acessoriamente, através de filões aplitopegmatíticos. Os estudos geológicos efectuados (e.g. ESPINHA MARQUES, 2001; ESPINHA MARQUES *et al.*, 2001a, b, *in press*; MARQUES *et al.*, 2003) permitem colocar a hipótese de a circulação profunda se fazer através de rochas graníticas subjacentes aos metassedimentos (tais como o granito de Cidadelhe). Esta ideia surge igualmente quando se consideram as características químicas destas águas, bas-

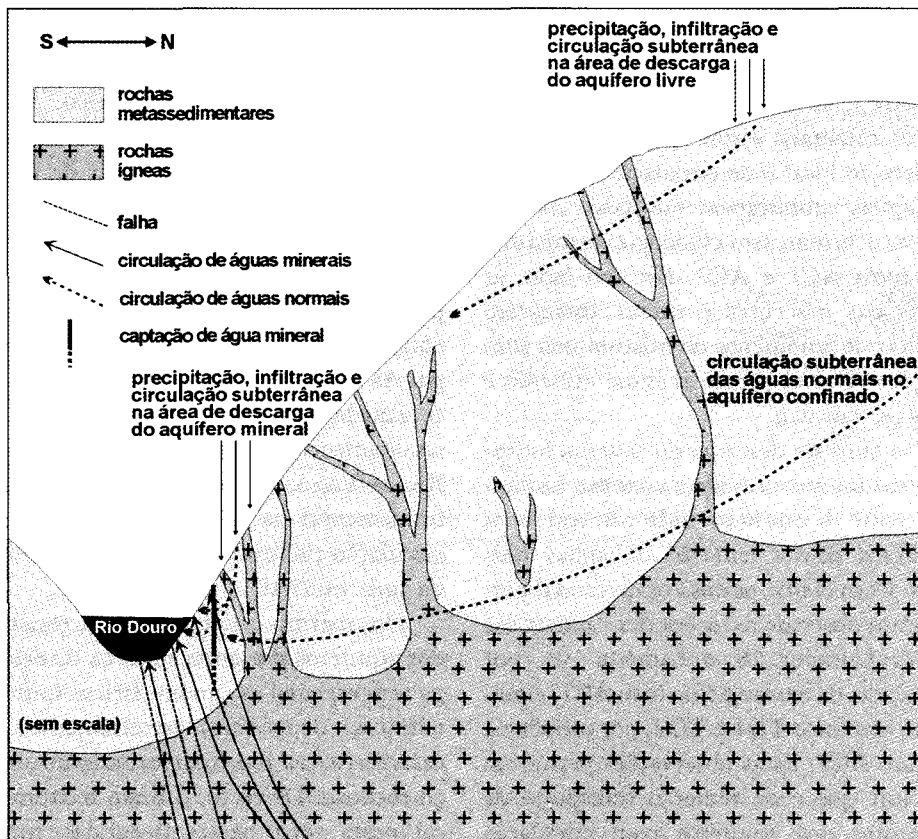


Figura 6. Representação esquemática da circulação hídrica subterrânea na zona de Caldas do Moledo.

tante semelhantes às que ocorrem em aquíferos graníticos noutros sistemas hidrominerais na Falha de Régua-Verin (ESPINHA MARQUES, 2001a, b, *in press*; MARQUES *et al.*, 2003).

O confinamento do aquífero hidromineral é comprovado pelo artesianismo repuxante observado em todos os furos (AC1, AC2, TD1 e TD2). A camada confinante deverá ter uma espessura de várias dezenas de metros, de acordo com os resultados da geofísica e da observação da evolução do quimismo da água ao longo da perfuração das captações AC1 e AC2 (ACAVACO, 1988).

As análises isotópicas permitiram verificar a existência de águas de infiltração distante e de circulação lenta e profunda (águas minerais) assim como de águas de infiltração local e de circulação mais rápida (águas subterrâneas normais). As primeiras ocorrem, sem evidência de mistura, nos furos AC1 e AC2. Por seu lado, as águas das nascentes e minas aparentam resultar de fenómenos de mistura, em proporções variáveis, entre as águas minerais e as águas normais.

Na zona de descarga do sistema hidromineral foi reconhecida a conexão hidráulica entre o aquífero hidromineral e os aquíferos com circulação de águas normais. Com efeito, os ensaios de caudal permitiram observar reduções dos caudais das minas Lameira 28 e Lameira 30, por influência da extracção no furo AC1, assim como nos furos TD1 e TD2, por influência do furo AC2. Estas observações permitem concluir que é de temer o transporte de poluentes dos aquíferos com circulação mais superficial para o aquífero hidromineral, caso as condições de exploração

imponham grandes rebaixamentos dos níveis potenciométricos.

As interferências hidráulicas referidas apontam para a existência de maior permeabilidade segundo as direcções entre N-S e NE-SW; esta ideia é reforçada pela escassa influência hidráulica entre os furos AC1 e AC2, verificada, igualmente, durante os ensaios de caudal. Estas direcções são concordantes com aquelas que se definiram com base nos estudos de geologia estrutural e nos estudos geofísicos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos pelos estudos multidisciplinares realizados permitem apresentar um quadro geológico, morfotectónico, hidrogeológico e hidrogeoquímico do sistema hidromineral de Caldas do Moledo.

O fluxo do sistema hidromineral é fortemente controlado pela geomorfologia, pela tectónica e pelas litologias presentes, entre a zona de recarga e a zona de descarga. As estruturas tectónicas, especialmente aquelas relacionadas com a zona de cisalhamento Vigo-Régua e com a falha de Régua-Verin, desempenham um papel fundamental na infiltração, na recarga e circulação profundas e, ainda, na ascensão da água mineral.

Do mesmo modo, as características dos aquíferos presentes na zona de descarga (em especial as características hidrodinâmicas) dependem, estreitamente, das características morfoestruturais do maciço rochoso. De facto, o fluxo hidromineral nesta zona parece depender, fundamentalmente, da presença de estruturas paralelas à falha de Régua-Verin e, em

menor medida, de estruturas relacionadas com a falha do Douro.

A existência de diferentes tipos químicos de águas no sistema hidromineral resulta de diferentes trajectos e interacções naturais ou artificiais com os meios percorridos. A composição isotópica das águas do sistema reflecte idênticas relações.

A perspectiva multidisciplinar adoptada para a realização destes estudos revelou uma elevada capacidade de contribuir para a melhoria das condições de exploração do recurso hidromineral. Os sistemas hidrominerais são realidades de grande complexidade, pelo que apenas podem ser abordados através do recurso conjugado aos conceitos, técnicas e métodos de trabalho de diferentes disciplinas científicas. Esta ideia pode ser reforçada se considerarmos que a exploração dos recursos geológicos, em geral, e dos recursos hidrominerais, em particular deverá ser enquadrada pelo paradigma do desenvolvimento sustentável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Junta de Turismo de Caldas do Moledo-Régua, por todo o apoio dispensado. Este estudo recebeu o apoio do Centro de Geologia da Universidade do Porto. São, ainda, devidos agradecimentos ao Doutor José Manuel Marques (IST, Lisboa), pelo apoio no estudo hidrogeoquímico e ao Doutor Helder I. Chaminé (ISEP, Porto) pelo apoio no estudo geotectónico. Agradece-se à Dr^a Maria José Afonso (ISEP, Porto) e ao Dr. Alberto Gomes (FLUP, Porto) os comentários a alguns tópicos do manuscrito. As trocas de impressões sobre a temática com o Professor J. A. Simões Cortez (FEUP, Porto) foram fundamentais para consolidar algumas ideias expressas neste trabalho.

Recibido: 07-VII-03
Aceptado: 19-VIII-03

REFERÊNCIAS

- ACAVACO – Sondagens e Fundações A.Cavaco, Lda (1988). *Furos de captação de água mineral nas Caldas do Moledo*. Relatório final, 5 pp e Anexos. Porto.
- ALENCÃO, A.M., PACHECO, F. & PORTUGAL FERREIRA, M. (2000). A bacia hidrográfica do rio Corgo (NE de Portugal): escoamento subterrâneo e parâmetros influentes. In: SAMPER, J.; LEITÃO, T.; FERNÁNDEZ, L. & RIBEIRO, L. (eds.). *Jornadas Hispano-Lusas sobre 'Las Aguas Subterráneas en el Noroeste de la Península Ibérica'*. Textos de las Jornadas, Mesa Redonda y Comunicaciones, A Coruña. AIH-GE & APRH. Publicaciones ITGE, Madrid. pp. 173-181.
- BAPTISTA, J. (1998). *Estudo neotectónico da zona de falha Penacova-Régua-Verin*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real. 280 pp. (Tese de doutoramento).
- BAPTISTA, J.; CABRAL, J. & RIBEIRO, A. (1998). Seismotectonics of Chaves and Moledo mineral springs in Penacova-Régua-Verin Fault Zone. In: AZERÊDO, A. C., (coord.), *Actas do V Congresso Nacional de Geologia. Comun. Inst. Geol. Min.*, Lisboa, 84 (1): D69-D72.
- BERNARDO DE SOUSA, M., 1982. *Litostratigrafia e estrutura do "Complexo Xisto-Grauváquico ante-Ordovício": Grupo do Douro (Nordeste de Portugal)*, 222 pp. Departamento de Geociências, Universidade de Coimbra. (Tese de Doutoramento).
- BERNARDO DE SOUSA, M., 1983. *Litostratigrafia do "Complexo Xisto-Grauváquico" – Grupo do Douro (NE de Portugal)*. *Mem. Not.*, Coimbra, 95: 1-63.
- BERNARDO DE SOUSA, M. & SEQUEIRA, A. J. D. (1989). *Notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal, escala 1/50 000, Nº 10-D (Alijó)*, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 59 pp.
- CABRAL, J. (1995). Neotectónica em Portugal Continental. *Mem. Inst. Geol. Min.*, Lisboa, 31: 1-265.
- CABRAL, J & RIBEIRO, A. (1988). *Carta Neotectónica de Portugal Continental, escala 1/100000*. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- CALADO, C. M. A. & ALMEIDA, C. (1993). Geoquímica do flúor em águas minerais da Zona Centro-Ibérica. In: NORONHA, F., MARQUES, M. & NOGUEIRA, P., (eds), IX Semana de Geoquímica e II Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, Porto, 1993. *Mem. Mus. Labor. Miner. Geol. Fac. Ciênc. Univ. Porto*, Porto, 3: 319-323.
- CANTO MACHADO, M. J. (1988). O quimismo das águas sulfúreas portuguesas. *Estudos Notas e Trabalhos Serv. Fom. Min.*, Porto, 30: 37-51.
- CARVALHO, J. M. (1993). Mineral and thermal water resources development in the Portuguese Hercynian massif. In: BANKS, S. & BANKS D., (eds.), *Hydrogeology of hard rocks. Memoires 24th Congr. Internat. Assoc. Hydrol.*, Oslo, Norway. 24 (1): 548-561.
- CARVALHO, J. M. (1996). Mineral water exploration and exploitation at the Portuguese Hercynian massif. *Environmental Geology*, 27: 252-258.
- CARVALHO, J. M., PLASÊNCIA, N., CHAMINÉ, H. I., RODRIGUES, B. C., DIAS, A. G. & SILVA, M. A. (2000). Recursos hídricos subterrâneos em formações cristalinas do Norte de Portugal. In: SAMPER, J.; LEITÃO, T.; FERNÁNDEZ, L. & RIBEIRO, L. (eds.). *Jornadas Hispano-Lusas sobre 'Las Aguas Subterráneas en el Noroeste de la Península Ibérica'*. Textos de las Jornadas, Mesa Redonda y Comunicaciones, A Coruña. AIH-GE & APRH. Publicaciones ITGE, Madrid. pp. 163-171.
- CARVALHO, J. M. & SILVA, L. F. (1988). Recursos e metodologias de desenvolvimento dos pólos geotérmicos de Trás-os-Montes: *Anais UTAD*, Vila Real, 2: 23-45.
- CHAMINE, H. I. & GASPAS, A. F. (1995). Estudo da compartimentação de maciços rochosos pela técnica de amostragem linear. Aplicação a uma travessa da Mina de Carvão de Germunde. *Estudos, Notas & Trabalhos Inst. Geol. Min.*, Porto, 37: 97-111.
- CHOFFAT, P. (1917). La ligne de dépressions Régua-Verín et ses sources carbonatées. Remarques et considérations. *Comun. Serv. Geol. Portg*, Lisboa, 12: 35-69.
- ESPINHA MARQUES, J. (2001). *Estudo de sistemas hidrominerais: o caso de Caldas do Moledo*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. 143 pp., 5 anexos. (Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica).
- ESPINHA MARQUES, J.; CHAMINÉ, H. I.; CARVALHO, J. M. & SODRÉ BORGES, F. (2001a). Tectónica regional do sector de Caldas

- do Moledo–Granjão–Cidadelhe (Falha de Penacova–Régua–Verín, N de Portugal): implicações no controlo das emergências hidro-minerais. *Comun. Inst. Geol. Min.*, Lisboa, 88: 203-212.
- ESPINHA MARQUES, J.; MARQUES, J. M.; CHAMINÉ, H. I.; GRAÇA, R. C.; CARVALHO, J. M.; AIRES-BARROS, L. & BORGES, F. S. (2001b). The newly described 'Poço Quente' thermal spring (Granjão–Caldas do Moledo sector, N Portugal): hydrogeological and tectonic implications. *Geociências*, Aveiro, 15: 19-35.
- ESPINHA MARQUES, J.; MARQUES, J. M.; CHAMINÉ, H. I.; GOMES, A. A.; FONSECA, P. E.; CARVALHO, J. M.; CARREIRA, P. M.; GRAÇA, R. C.; AIRES-BARROS, L. & BORGES, F. S. (in press). Nascente termal do Poço Quente (Granjão–Caldas do Moledo, Norte de Portugal): morfoestrutura, geoquímica e hidrogeologia. *Cadernos Lab. Xeol. Laxe*, A Coruña, 2003. (este volume)
- FERNANDES, L. A. S. (1944). *Esboço litológico da região Duriense*. Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos. 28 pp., 3 mapas.
- LIMA, A. S. (1994). *Hidrogeologia de regiões graníticas (Braga–NW de Portugal)*, 202 pp. Universidade do Minho, Braga. (Tese de Mestrado).
- LOHMAN, S.W. (1972). Groundwater hydraulics. *US Geol. Surv. Professional Paper*, Washington, DC, 708: 1-70.
- MARQUES, J. M.; AIRES-BARROS, L. & GRAÇA, R. C. (1998). Nota preliminar sobre a geoquímica isotópica das águas mesotermais de Carlão, São Lourenço e Moledo. In: AZERÊDO, A. C., (coord.), *Actas do V Congresso Nacional de Geologia*. *Comun. Inst. Geol. Min.*, 84 (2), E13–E16.
- MARQUES, J. M.; CARREIRA, P. M.; AIRES-BARROS, L.; GRAÇA, R. C. (2000). Nature and role of CO₂ in some hot and cold HCO₃/Na/CO₂-rich Portuguese waters: a review and reinterpretation. *Environmental Geology*, 40 (1/2): 53-63.
- MARQUES, J. M.; ESPINHA MARQUES, J.; CARREIRA, P. M.; GRAÇA, R. C.; AIRES-BARROS, L.; CARVALHO, J. M.; CHAMINÉ, H. I. & SODRÉ BORGES, F. (2003). Geothermal fluids circulation at Caldas do Moledo area, Northern Portugal: geochemical and isotopic signatures. *Geofluids*, 3 (3): 189-201.
- MENDES, J. C. & BETTENCOURT, M. L. (1980). Contribuição para o estudo do balanço climático da água no solo e classificação climática de Portugal Continental. In: *O Clima de Portugal*. *Inst. Nac. Met. Geof.*, Lisboa, 24: 1-282.
- OLIVEIRA, J. T., PEREIRA, E., RAMALHO, M., ANTUNES, M. T. & MONTEIRO, J. H., Coords. (1992). *Carta Geológica de Portugal à escala de 1/500 000*, 5ª Edição, 2 Folhas. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- PEREIRA, M. R. (1999). Quantificação da recarga subterrânea em rochas fracturadas da bacia hidrográfica do Tua. In: *Seminário Sobre Águas Subterrâneas*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil-LNEC, Lisboa.
- PILAR, L. & FERNANDES, A. P. (1962). Contribuição para o conhecimento geológico da região de Amarante. In: *Estudos Científicos oferecidos em homenagem ao Prof. Doutor J. Carrington da Costa*. Junta de Investigações do Ultramar. pp. 543-560.
- RIBEIRO, A., QUESADA, C. & DALLMEYER, R. D. (1990). Geodynamic evolution of the Iberian Massif. In: DALLMEYER, R. D. & MARTÍNEZ-GARCÍA, E., (eds.), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg. pp. 397-410.
- RIBEIRO, O., LAUTENSACH, H. & DAVEAU, S., 1994. *Geografia de Portugal. O ritmo climático e a paisagem*. Volumes 1 e 2, 623 pp. Editor João Sá da Costa, Lisboa.
- SEIFERT, H. (1967). *Consequências da construção da barragem de Carrapatelo sobre as nascentes termais e projecto de novas captações*. Gabinete de Estudos Geológicos e Hidrogeológicos, Lda., Lisboa. 13 pp. (Relatório inédito).
- SEIFERT, H. (1969). Caldas de Moledo. *Bol. Minas*, Lisboa, 6 (1): 66-68.
- SEIFERT, H. & VICENTE, A. (1968). Caldas de Moledo. *Bol. Minas*, Lisboa, 5 (3): 226-227.
- TEIXEIRA, C.; FERNANDES, A. P. & PERES, A. (1967). *Notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000. Folha 10-C (Peso da Régua)*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 60 pp.