

## Nascente termal do Poço Quente (Granjão–Caldas do Moledo, Norte de Portugal): morfoestrutura, geoquímica e hidrogeologia

### Poço Quente thermal spring (Granjão–Caldas do Moledo, Northern Portugal): morphostructure, geochemistry and hydrogeology

ESPINHA MARQUES, J.<sup>1</sup>; MARQUES, J. M.<sup>2</sup>; CHAMINÉ, H. I.<sup>3</sup>; GOMES, A. A.<sup>4</sup>;  
FONSECA, P. E.<sup>5</sup>; CARVALHO, J. M.<sup>6</sup>; CARREIRA, P. M.<sup>7</sup>; GRAÇA, R. C.<sup>2</sup>; AIRES-  
BARROS, L.<sup>2</sup> & BORGES, F. S.<sup>1</sup>

#### Abstract

The results of multidisciplinary studies concerning the Poço Quente thermal ( $T \approx 22.9^\circ\text{C}$ ) spring waters, located at the Granjão–Caldas do Moledo sector (Peso da Régua, Northern Portugal), are presented. The hydrogeological and geotectonic studies indicate that the location of Poço Quente spring is mainly conditioned by the local structural geology features of the aquifer system. The main features of the local geotectonic framework are the geologic boundary between the Schist-Greywacke Complex metasedimentary rocks and the Cidadelhe granite and, additionally, the intersection of NW-SE, NNE-SSW and E-W structural discontinuities, related to the Vigo-Régua shear zone, to the Régua-Verin fault zone and to the Douro fault, respectively. Hydrogeochemical and isotopic ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  and  $^3\text{H}$ ) analysis were used to investigate the inter-relation between the Poço Quente thermal waters and the Caldas do Moledo hydromineral system. When compared with Caldas do Moledo thermomineral waters, the heavier isotopic composition of Poço Quente thermal spring waters, strongly controlled by the *altitude effect*, indicate that we are in the presence of a locally recharged hydrogeological circulation system, with no connection with Caldas do Moledo geothermal system. Cl,  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$  values of Poço Quente thermal waters indicate that these waters should not be faced as the result of a

mixing process between deep thermomineral waters (of Caldas do Moledo type) and local meteoric waters. The results obtained are extremely important for the sustainable management of the hydromineral and geothermal resources of the Granjão-Caldas do Moledo sector.

**Key words:** Poço Quente, thermal waters, tectonics, geomorphology hydrogeochemistry, isotopes, hydrogeology, Northern Portugal.

(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 Engenharia de Minas e Georrecursos. Laboratório de Mineralogia e Petrologia (LAM-PIST). Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa. Portugal. (jmmarques@mail.ist.utl.pt)

(3) Departamento de Engenharia Geotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto. Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, P-4200-072 Porto. Portugal, e Centro de Minerais Industriais e Argilas da Universidade de Aveiro. (hchamine@geo.ua.pt)

(4) Departamento de Geografia da Faculdade de Letras da Universidade do Porto e Gabinete de Estudos de Desenvolvimento Económico e Social (GEDES). Via Panorâmica, s/n, 4150-564 Porto. Portugal.

(5) Departamento de Geologia e LATTEX da Universidade de Lisboa. Ed. C2, 5º piso. Campo Grande. 1749-061 Lisboa. Portugal.

(6) Departamento de Geociências da Universidade de Évora, Apartado 94. 7001 Évora, Portugal, e Centro de Geologia da Universidade do Porto.

(7) Instituto Tecnológico e Nuclear (ITN). Estrada Nacional Nº 10, 2686-953 Sacavém Codex, Portugal.

## INTRODUÇÃO

As nascentes termominerais estão, frequentemente, relacionadas com sistemas hidrogeológicos condicionados pelas condições tectónicas e morfoestruturais. A presença de estruturas tectónicas (especialmente falhas afectando zonas profundas da crosta) origina zonas de escoamento preferenciais, tais como fissuras, diáclases ou falhas (e.g., INGEBRITSEN & SANFORD, 1998; INGEBRITSEN & MANNING, 1999; BITZER *et al.*, 2001). Uma anomalia geotérmica num maciço rochoso pode ter origem na redistribuição de energia térmica devida à movimentação ascendente ou descendente de fluidos (OLIVER, 1986).

A localização das nascentes de águas minerais ao longo do traçado da falha de Régua-Verín constitui um indício importante de actividade neotectónica ao longo deste acidente maior no Maciço Hespérico (e.g., RIBEIRO & ALMEIDA, 1981; BAPTISTA, 1998; BAPTISTA *et al.*, 1998; CALADO, 2003). Deste modo, as ocorrências termominerais, relacionadas com esta falha, são controlados, por um lado, por estruturas profundas de direcção geral N-S (relacionadas com zonas propícias à circulação) e, por outro lado, por estruturas de direcção NNE-SSW, regra geral muito profundas, e activas, as quais induzem circulação dos fluidos pela sua actividade sismotectónica (entre outros modos por bombagem sísmica). A actividade sísmica parece ser contínua ao longo do tempo, e concentrada nos locais onde ocorrem as emergências termominerais. A circulação de fluidos e as reacções fluido-rocha são compo-

nentes activas dos processos de ruptura sísmica, originando a fracturação hidráulica do maciço. As variações na tensão relacionadas com o ciclo de tensão sísmica, controlam a manutenção e a circulação das águas termominerais, nos segmentos activos da falha de Régua-Verín.

As zonas intensamente fracturadas, correspondentes à intersecção destes tipos de estruturas, designadas habitualmente por nós tectónicos, são os locais mais propícios para a circulação, em regime forçado, dos fluidos termominerais (INGEBRITSEN & MANNING, 1999; BITZER *et al.*, 2001). Os segmentos de falha activos podem actuar como barreiras e/ou como condutas, constituindo uma componente importante do controlo do fluxo termomineral (OLIVER, 1986). A circulação de fluidos e a sismicidade induzida ao longo de falhas activas são processos complexos e cíclicos auto-sustentados, os quais estão, em parte, relacionados com a tensão tectónica regional. Assim, no caso da falha de Régua-Verín, os acidentes de direcção NNE-SSW podem, também, funcionar como estruturas-barreira, muitas das vezes impermeáveis, que compartimentam o maciço, em blocos de forma aproximadamente rômbrica, favorecendo a circulação dos fluidos.

Para a diversidade e a grande variedade de características físico-químicas das águas termominerais contribui, certamente, o quadro evolutivo tectonoestrutural dos diferentes ramos que constituem as megaestruturas regionais. Para tal, pode-se ter em conta factores como (INGEBRITSEN & SANFORD, 1998): i) o gradiente geotérmico e/ou a temperatura a que os fluidos são submetidos, ii) o tempo

de contacto e de interacção fluido-rocha, iii) a velocidade de circulação dos fluidos, iv) a profundidade e as características do reservatório.

A grande maioria das águas subterrâneas (das quais as águas termominerais são um excelente exemplo) tem a sua origem na precipitação atmosférica (IAEA, 1981, 1983). No entanto, em alguns casos, os processos de recarga e circulação subterrânea são relativamente complexos, sendo necessário obter o maior número possível de informações acerca dos processos envolvidos.

#### O SISTEMA HIDROGEOLÓGICO DO POÇO QUENTE

Um dos principais objectivos deste estudo consiste em apresentar uma nova contribuição para a elaboração de um modelo hidrogeológico conceptual associado às águas do Poço Quente, situado a cerca de 800m para NW do estabelecimento termal de Caldas do Moledo e a, aproximadamente, 300m para NNE da ponte de Granjão (Peso da Régua, N de Portugal). Trata-se de uma temática extremamente importante, tendo em vista a reavaliação dos recursos hidrominerais e geotérmicos da área das Caldas do Moledo. Neste âmbito, é fundamental averiguar a existência de inter-relações entre as águas subterrâneas do Poço Quente e o sistema hidromineral e geotérmico de Caldas do Moledo.

A nascente do Poço Quente foi identificada durante a realização do inventário hidrogeológico realizado a propósito da definição do perímetro de protecção das captações de água mineral de Caldas do

Moledo (ESPINHA MARQUES, 2001). Esta nascente não é referida em trabalhos anteriores (e.g., HENRIQUES, 1726; FERNANDES, 1944; ACCIAIUOLI, 1949/50, 1952/53; ALMEIDA & ALMEIDA, 1970; CANTO MACHADO, 1988; CARVALHO, 1996a,b; IGM, 1999; MARQUES *et al.*, 2000a; CALADO, 2001). A água do Poço Quente distingue-se das águas subterrâneas normais da região por apresentar características termais: i) trata-se de uma água de circuito hidrogeológico mais longo, profundo e lento, com características geoquímicas estáveis (isto é, ao abrigo de flutuações sazonais) e diferentes daquelas das águas subterrâneas normais da região; ii) a temperatura de emergência é de 22,9°C, a qual permite classificar estas águas como termais de acordo com o critério de SCHOLLER (1962, 1982).

Devido à referida complexidade dos fenómenos envolvidos no funcionamento de sistemas hidrominerais e geotérmicos, a avaliação dos georrecursos que se lhes associam deverá adoptar uma perspectiva multidisciplinar, mais conveniente para abranger a globalidade de processos (puramente naturais ou condicionados pelas actividades humanas) que têm lugar. No caso da nascente do Poço Quente e do sistema hidromineral de Caldas do Moledo, esta perspectiva revela-se fundamental para se levar a cabo a exploração dos respectivos recursos hidrominerais e geotérmicos, respeitando o paradigma do desenvolvimento sustentável, o qual implica que a qualidade e a quantidade dos mesmos deverá ser preservada a curto e a longo prazo. A este propósito, convém referir que o Poço Quente se localiza a menos de 100m do

limite oeste da zona alargada do perímetro de protecção das captações de água termo-mineral de Caldas do Moledo.

Assim, os estudos realizados em torno da nascente do Poço Quente conduziram a um modelo hidrogeológico conceptual que permitirá apoiar a realização de estudos subsequentes, assim como a realização de eventuais sondagens de pesquisa e captação. Para estes estudos contribuíram os conceitos, métodos e técnicas de diversas disciplinas, em particular a geologia estrutural e a tectónica, a geomorfologia, a geoquímica (convencional e isotópica) e a hidrogeologia.

#### ENQUADRAMENTO GEOTECTÓNICO REGIONAL E MORFOESTRUTURAL

O sector de Granjão-Caldas do Moledo (figura 1) situa-se na Zona Centro-Ibérica do Terreno Autóctone Ibérico (RIBEIRO *et al.*, 1990), mais precisamente entre dois troços principais da falha de Régua-Verín (também designada por Penacova-Régua-Verín) — e.g., CHOFFAT (1917), CARVALHO (1993, 1996a), BAPTISTA (1998) — e o segmento Amarante-Régua relacionado com o megacisalhamento de Vigo-Régua (também designado por Vigo-Vila Nova de Cerveira-Régua) — PILAR & FERNANDES (1962), BAPTISTA (1998). Segundo CABRAL (1995) a linha de fractura de Penacova-Régua-Verín é uma falha de desligamento esquerdo, com importantes deslocamentos verticais associados em alguns troços, do tipo “pull-apart”, constituindo zonas favoráveis para a instalação de corpos intrusivos. Este importante acidente foi reactivado no Quaternário e, para além dessas evi-

dências, apresenta actividade tectónica nos tempos actuais. Esta depressão tectónica associa-se a um desligamento tardi-varisco que sofreu reactivação posterior, pertencente ao mesmo sistema de fracturas do acidente de Bragança-Vilariça-Manteigas, a que é subparalelo (CABRAL & RIBEIRO, 1988; CABRAL, 1995).

Neste sector, o traçado do vale do Douro apresenta duas orientações principais: WNW-ESE (relacionada com o megacisalhamento Vigo-Régua) e NNE-SSW (relacionada com a falha de Régua-Verín). Trabalhos regionais prévios (e.g., CHOFFAT, 1917; ACCIAIOLI, 1952/53; CABRAL, 1995; BAPTISTA *et al.*, 1998; BAPTISTA, 1998) apontam para a existência de um controlo morfoestrutural das nascentes hidrominerais localizadas ao longo da depressão de Penacova-Régua-Verín. De acordo com BAPTISTA *et al.* (1998), as características tectónicas e morfoestruturais são preponderantes para a explicação da génese das ocorrências hidrominerais, devido à criação de zonas de maior permeabilidade por fracturação.

#### Geomorfologia

A geomorfologia da região envolvente do sector de Granjão-Caldas do Moledo (figuras 2 e 3) é dominada pelo entalhe profundo do vale do rio Douro (e de alguns dos seus afluentes) enquadrado, a norte, pelos cumes de natureza xisto-quartzítica da serra do Marão (1415m de altitude) e, a sul, pela serra das Meadas (1141m de altitude). Nesta região, o vale do rio Douro é encaixado, excepto na área da cidade de Peso da Régua, onde se desenvolve um vale de fundo mais amplo.

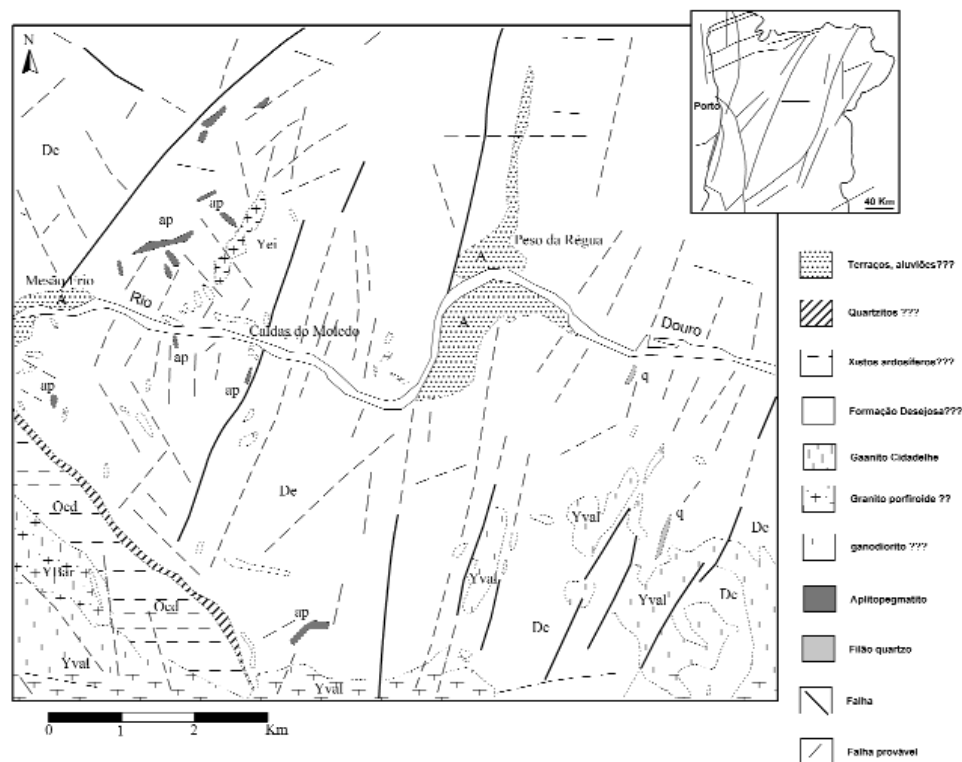


Figura 1. Mapa geológico-estrutural da região de Granjão-Caldas do Moledo, Peso da Régua (base geológica adaptada de ESPINHA MARQUES *et al.*, 2001a; base neotectónica de CABRAL & RIBEIRO, 1988).

Depósitos de Cobertura (*Holocénico a Plio-Pleistocénico*): A – aluviões actuais; terraços fluviais; Rochas Metassedimentares (*Paleozóico inferior*): De – Formação de Desejosa (Complexo Xisto-Grauváquico) do Grupo do Douro, Ord – Xistos argilosos, ardosíferos e quartzito ‘Armoricano’; Granitóides (sin a tardi-fase  $D_3$  varisca):  $\gamma_{Ci}$  - granito de Cidadele (grão médio a fino, moscovítico e turmalínico),  $\gamma_{Val}$  - granito de Valdigem (grão médio a fino, moscovítico e turmalínico),  $\gamma_{Bar}$  - granito de Barro (porfíroide de grão médio a fino); Filões: q – quartzo; ap – aplitepegmatito e/ou pegmatito.

O vale do rio Douro é bastante sinuoso e encaixado, dando origem a desníveis importantes entre o leito do rio (*ca.* 50m de altitude) e os cumes adjacentes, dos quais se destacam os que correspondem aos v.g. de Santa Sabina (443m), de Mesquitela (729m) e de Rojão (886m). A rede de drenagem apresenta, com frequência, troços de linhas de água rectilí-

neas, com inflexões súbitas, sendo numerosos os paralelismos entre conjuntos de linhas de água. Estas evidências denunciam, de imediato, um forte controlo estrutural regional.

O trajecto das linhas de água é amiúde, paralelo aos alinhamentos dos vários ramos da falha de Régua–Verín, facto especialmente evidente no troço 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 rectilíneas e bastante inclinadas (por vezes  $>40^\circ$  de declive) — Espinha Marques (2001).

Segundo BRUM FERREIRA (1978), podem-se definir vários níveis de aplanamento para esta área, embora a dissecação muito densa tenha reduzido, na generalidade, as superfícies aplanadas a estreitos interflúvios. Para este retalhamento também contribui o facto deste sector ser densamente tectonizado, donde resulta a movimentação vertical das superfícies aplanadas.

Deste modo, poderá relacionar-se o topo aplanado das elevações acima dos 800 metros com o nível da superfície fundamental definido pelos cimos dos planaltos do Norte da Beira (BRUM FERREIRA, 1978). Abaixo desta superfície definem-se vários níveis de aplanamento, dos quais se destacam os níveis ligados ao encaixe do rio Douro: o nível dos 600-650 metros (Moura Morta); o nível dos 350-400 m (Cidadelhe) e o nível dos 200-250 metros (Mesão Frio). Saliente-se que o autor citado refere que os níveis de aplanamento no Complexo Xisto-Grauváquico são bem definidos, a oriente de Mesão Frio, por contraste com a geomorfologia do maciço granítico da região de Amarante-Mesão Frio.

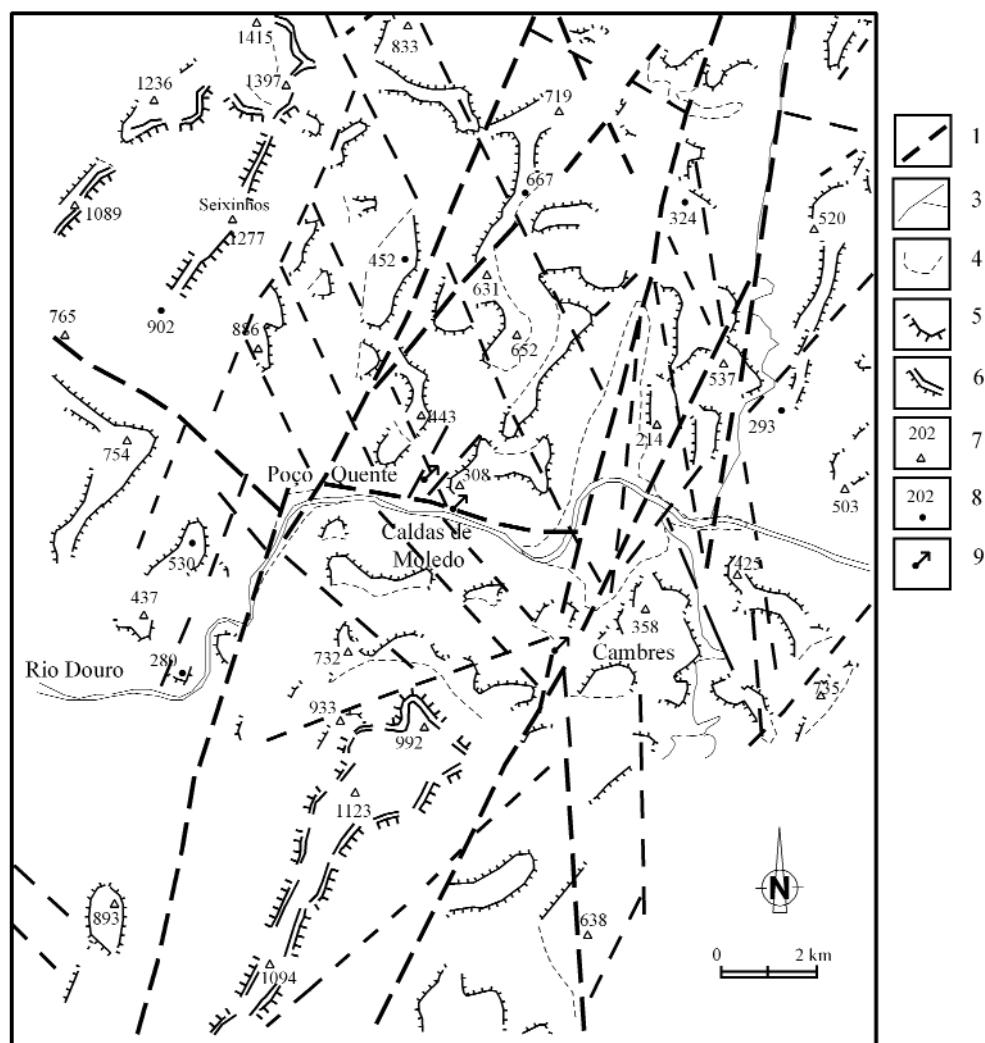
O vale da ribeira da Seromenha, onde se localiza a nascente do Poço Quente, apresenta dois tipos de perfil topográfico distintos. Assim, na área granítica, o rio tem um traçado rectilíneo num vale profundo e em V apertado, enquanto que nos xistos forma um vale ligeiramente mais largo e o curso de água segue um traçado

sinuoso. Neste local, verifica-se que, no fundo do vale talhado nos granitos, se desenvolve um nível aplanado antigo, ao qual se seguiu o encaixe actual. Para a explicação deste aplanamento residual e da posterior ruptura no perfil longitudinal, concorrem, pelo menos, três razões: i) um abaixamento do nível de base da ribeira (no caso, o rio Douro), ii) a manifestação do fenómeno de erosão diferencial, uma vez que o nível de aplanamento não se define nos xistos, e iii) movimentação neotectónica recente que tenha motivado a ruptura do perfil.

O sector terminal desta ribeira parece ser condicionado tectonicamente, já que é concordante com a direcção média da falha de Régua-Verín e está na continuidade de um importante alinhamento tectónico (vale da ribeira de S. Martinho, homólogo da ribeira da Seromenha) e desnivelamento topográfico existentes na margem esquerda do rio Douro.

#### Unidades geológicas regionais

Na região envolvente do sector de Granjão-Caldas do Moledo — em tempos conhecida como Caldas do Granjão (MACHADO, 1973) — (figuras 1 e 3) ocorrem, fundamentalmente, rochas metassedimentares de natureza turbidítica, de idade câmbria inferior, enquadradas no “Complexo Xisto-Grauváquico” (Formação de Desejosa) do Grupo do Douro (BERNARDO DE SOUSA, 1982, 1983; BERNARDO DE SOUSA & SEQUEIRA, 1989). As rochas metassedimentares constam de metapelitos que apresentam, localmente, cor cinzenta clara a escura, alternando com níveis metapsa-



1 - Falha e/ou lineamento tectónico; 2 - Curso de água; 3 - Base de vertente; 4 - Nivel de aplanção inferior; 5 - Nivel de aplanção superior; 6 - vértice geodésico; 7 - Ponto cotado; 8 - Nascente de água termal

Figura 2. Esboço morfoestrutural da região de Granjão-Caldas do Moledo (base neotectónica adaptada de BAPTISTA, 1998).

míticos esbranquiçados, exibindo o conjunto um aspecto listrado. Foram também reconhecidos níveis de rochas calcossilicadas. A unidade metapelítica apresenta-se, em regra, como um conjunto muito

homogéneo, monótono, e exibe uma fissilidade muito acentuada.

Foi identificado um afloramento granítico, cartografável, que se estende pelo vale da ribeira da Seromenha (próximo da



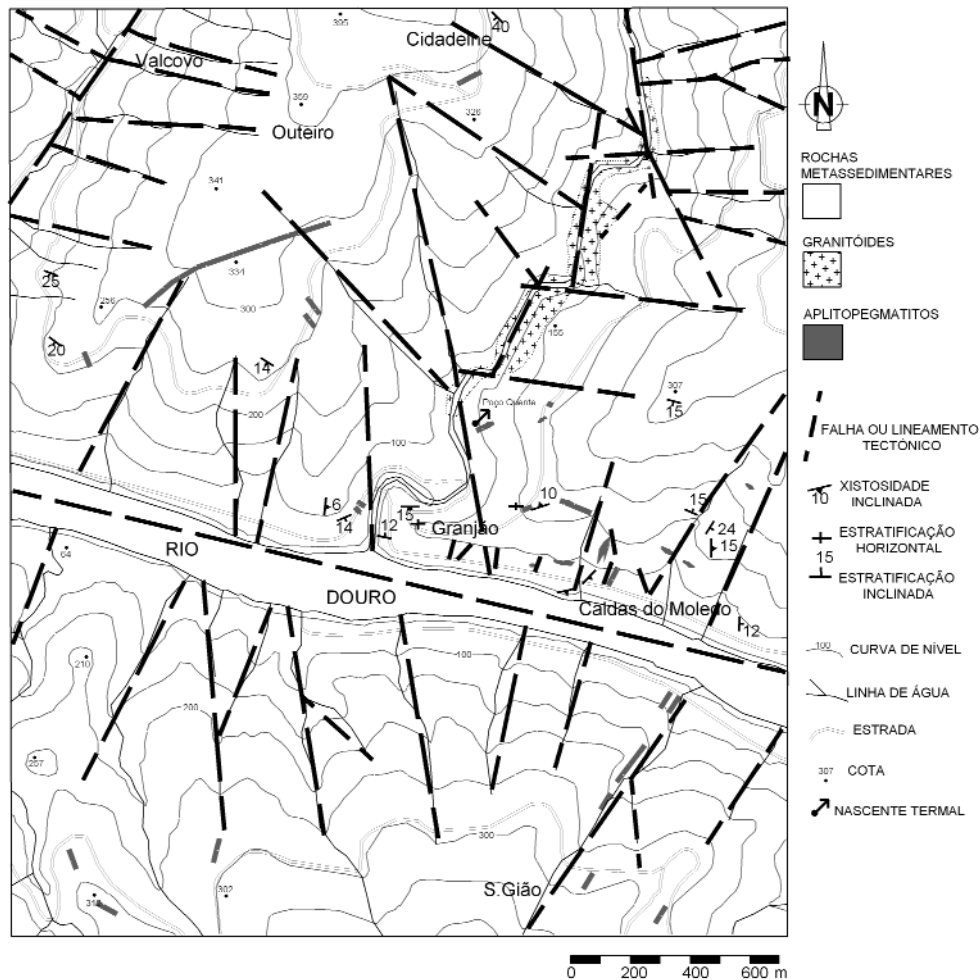


Figura 3. Esboço geológico do sector de Granjão-Caldas do Moledo (adaptado de ESPINHA MARQUES, 2001a).

localidade de Cidadelhe), ao longo de *ca.* 1500 m, com uma largura que chega a atingir 200 m (ESPINHA MARQUES, 2001; ESPINHA MARQUES *et al.*, 2001a,b). A presença deste granitóide não se encontra assinalada na cartografia geológica publicada (*cf.* FERNANDES, 1944; TEIXEIRA *et al.*, 1967). Há, contudo,

uma breve referência feita por FERNANDES (1944), a um pequeno afloramento (600m<sup>2</sup>) granitóide na área de Cidadelhe.

O granitóide de Cidadelhe é de grão médio a fino, moscovítico e com turmalina. Mostra aspectos que apontam tratar-se de um granitóide algo evoluído, em termos geoquímicos, tais como o desenvolvi-

mento de moscovite, de turmalina e de feldspato potássico. Esta fácies apresenta características petrográficas similares às descritas para os granitos de Valdigem (TEIXEIRA *et al.*, 1967) e de Favaios (BERNARDO DE SOUSA & SEQUEIRA, 1989). A observação em lâmina delgada do granitóide de Cidadelhe revelou que a mineralogia essencial é composta por quartzo, moscovite, microclina e clorite; acessoriamente, contém sericite, zircão, apatite e turmalina.

O granitóide de Cidadelhe encontra-se associado espacialmente a alinhamentos tectónicos de orientação geral NNE-SSW e WNW-ESE, sugerindo tratar-se de um granitóide tardi a pós-tectónico, segundo a classificação proposta por FERREIRA *et al.* (1987). Encontra-se, em curso, uma caracterização geoquímica e geocronológica de pormenor que permitirá, concretamente, refinar o quadro geodinâmico da instalação deste granitóide e das rochas filonianas associadas.

O contacto com o encaixante metassedimentar é brusco, tectónico, e observam-se com frequência, junto deste, corneanas metapelíticas mosqueadas. Ocorrem, ainda, neste sector, numerosos filões e massas aplitopegmatíticas e pegmatíticas, instaladas em zonas de fractura na unidade metassedimentar.

### Tectónica

Foram efectuados estudos preliminares relativos à geologia estrutural regional e local, com ênfase nos aspectos relacionados com as descontinuidades, tendo em vista definir a compartimentação do maciço rochoso e conseguir uma melhor compreensão da circulação das águas subterrâneas.

Assim, procedeu-se a um levantamento estrutural das descontinuidades principais (e.g., estratificação, xistosidade, diáclases e falhas). As superfícies de 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 (CXG) é predominantemente normal à xistosidade regional. As fendas de tracção são normalmente preenchidas por quartzo e são relativamente comuns nas bancadas metagrauváquicas.

Recorrendo à fotografia aérea, à topografia e a um modelo digital de terreno, foi possível identificar os principais lineamentos estruturais regionais. Efectuou-se, ainda, um levantamento, em diversos taludes e afloramentos, das atitudes de diáclases e falhas através da técnica de amostragem linear (e.g., CHAMINÉ & GASPAS, 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, de orientação média N135°E a N150°E. A direcção das descontinuidades NNE-SSW é próxima da orientação da zona da falha de Régua-Verín.

## HIDROGEOLOGIA E HIDROGEOQUÍMICA

### Ocorrência da nascente termal do Poço Quente

Foi inventariada uma nascente de água termal — designada pelo topónimo local pelo qual é conhecida, i.e., nascente do Poço Quente (próximo da Quinta da Esperança) situada a cerca de 800m para

NW do estabelecimento termal de Caldas do Moledo e a, aproximadamente, 300m para NNE da ponte de Granjão, a *ca.* 80m de altitude (figura 3).

Neste sector, as descontinuidades de orientação NNE-SSW (subconcordantes com a falha de Régua-Verín) a NW-SE (subparalelas ao megacisalhamento de Vigo-Régua), contribuem, localmente, para o controlo do transporte dos fluidos hidrominerais até à superfície. Este controlo poderá, ainda, depender da estrutura maior — de orientação média E-W, denominada neste trabalho como falha do rio Douro (SEIFERT, 1967, 1969; SEIFERT & VICENTE, 1968; CARVALHO & SILVA, 1988) — assim como das descontinuidades que lhe são subparalelas, as quais compartimentam o maciço rochoso na encosta norte do vale do Douro. Deste modo, a falha do Douro funcionaria como estrutura hidrogeológica actuando como barreira, contribuindo para a ascensão dos fluidos hidrominerais. Outras estruturas hidrogeológicas são aquelas relacionadas com a ocorrência de rochas granitoides com o seu cortejo de filões e massas aplitopegmatíticas. O granito de Cidadelhe cartografado por ESPINHA MARQUES *et al.* (2001a), e as massas graníticas referenciadas por SEIFERT (1967, 1969) no sector de Caldas do Moledo são exemplos destas ocorrências.

O quadro geológico-estrutural local denuncia um forte controlo litotectónico da circulação hidrogeológica. Assim, a nascente do Poço Quente encontra-se associada a um nó tectónico materializado pela intersecção de uma rede de descontinuidades com orientações médias NW-SE, NNE-SSW e E-W. O enquadramento geotectónico local é, ainda, caracterizado pela

proximidade do limite geológico entre as rochas metassedimentares (CXG) e o granitóide de Cidadelhe. A emergência ocorre através da superfície de contacto entre os metassedimentos e um filão aplitopegmatítico com uma possança que ronda 1,5m, e com atitude de N80°E;60°SE. Aquele contacto apresenta indícios de movimentação tectónica materializados pela existência de estrias de deslizamento sub-horizontais.

A temperatura desta nascente é de 22,9°C e o caudal foi avaliado em *ca.* 1l/s. Esta nascente classifica-se como termal, de acordo com o critério de SCHOELLER (1962, 1982), segundo o qual a temperatura de uma água termal deverá superar em 4°C a temperatura média do ar da região (*ca.* 15°C, neste caso).

#### Amostragem e métodos analíticos

Os trabalhos de campo tiveram como objectivo a colheita de amostras quer de águas subterrâneas normais (provenientes de nascentes) quer de águas termominerais (provenientes de nascentes ou de furos de captação) na região em estudo. Durante a colheita procedeu-se, *in situ*, à determinação da temperatura (°C), da condutividade eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) e do pH, de todas as águas amostradas.

No Laboratório de Mineralogia e Petrologia do Instituto Superior Técnico (LAMPIS) determinaram-se as concentrações dos elementos maiores através das seguintes técnicas analíticas: espectrofotometria de absorção atómica para o Ca e Mg; espectrofotometria de emissão para o Na, K e Li; métodos colorimétricos para a sílica e F; cromatografia iónica para o Cl, NO<sub>3</sub> e SO<sub>4</sub>; potenciometria para o HS, HCO<sub>3</sub> e CO<sub>3</sub>.

As determinações dos valores  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  nas águas foram efectuadas no Instituto Tecnológico e Nuclear (ITN) segundo os métodos analíticos descritos por EPSTEIN & MAYEDA (1953) e FRIEDMAN (1953), respectivamente, sendo expressos na notação  $\delta$  (desvio em permilagem relativamente ao padrão internacional V-SMOW). As análises de  $^3\text{H}$  foram, igualmente, efectuadas no ITN, utilizando-se a técnica de enriquecimento electrolítico e posterior medição das taxas de contagem por cintilação líquida. Os valores de  $^3\text{H}$  estão expressos em Unidades de Trítio (TU).

#### Caracterização hidrogeoquímica

Nos últimos anos, temos vindo a dar especial atenção à caracterização hidrogeoquímica das águas termominerais das Caldas do Moledo (ESPINHA MARQUES, 2001; MARQUES *et al.*, 1998, 2000a,b, 2003). Neste contexto, águas subterrâneas normais e termominerais locais, provenientes de diversas nascentes e furos de captação, têm vindo a ser amostradas para caracterização geoquímica e isotópica (tabelas 1 e 2). Conforme referido anteriormente, no decorrer de trabalhos de campo efectuados recentemente, procedeu-se à identificação de uma nascente termal (Poço Quente) localizada na área do Granjão. Estas águas termais apresentam temperatura de emergência de  $\approx 22.9^\circ\text{C}$ , e são caracterizadas por:

- i) pH = 6.7,
- ii) condutividade eléctrica  $\approx 340 \mu\text{S}/\text{cm}$ ,
- iii)  $\text{HCO}_3^-$  é o anião dominante,
- iv) Na é o catião dominante,
- v) valores de sílica elevados ( $\text{SiO}_2 \approx 45 \text{ mg/l}$ ),
- vi) presença de F (até 5 mg/l).

As águas termais do Poço Quente apresentam temperatura de emergência praticamente constante ao longo de todo o ano, temperatura esta bastante superior à temperatura média anual da região ( $\approx 15^\circ\text{C}$ ). Este facto corrobora a ideia de que as águas da nascente Poço Quente deverão ser encaradas como manifestações superficiais de um sistema hidrogeológico de características termais.

No entanto, quando comparadas com as águas termominerais das Caldas do Moledo (furos AC1 e AC2), as águas termais do Poço Quente apresentam características geoquímicas distintas, nomeadamente (ver tabela 1):

- i) temperatura inferior.
- ii) pH mais baixo,
- iii) valores de Na, Li, F e  $\text{HCO}_3^-$  inferiores,
- iv) valores de K, Ca, Mg,  $\text{SO}_4$  e  $\text{NO}_3^-$  mais elevados;
- v) ausência de espécies reduzidas de enxofre (HS)

Conforme indicado pela fácies  $\text{HCO}_3^-$ -Na, ao quimismo das águas termais do Poço Quente deverá estar associada a interacção água-rocha granitóide. De facto, a presença de F nestas águas deverá ser encarada como o resultado da interacção com alguns dos minerais (apatite e turmalina) presentes nas rochas granitóides da região. A ausência de espécies reduzidas de enxofre nestas águas deve ser encarada como uma das principais assinaturas químicas para as distinguir das águas termominerais das Caldas do Moledo.

A localização geográfica e o enquadramento geológico da nascente Poço Quente sugerem a possibilidade de existir alguma correlação hidrogeológica com as águas termominerais das Caldas do Moledo. De

Referência	T	pH	Cond.	Na	K	Ca	Mg	Li	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Cl	F	HS	SiO <sub>2</sub>
Lameira 30 (nt) +	41.2	9.0	345	75.0	1.0	2.4	n.d.	0.20	75.0	5.3	16.4	n.d.	18.4	18.7	1.48	49.0
Fresca (nt) +	27.6	8.0	451	70.0	2.3	19.0	4.4	0.37	86.0	0.6	69.5	0.3	20.8	15.0	n.d.	47.1
AC1 (ft) +	46.0	9.2	339	75.0	1.0	2.4	n.d.	0.20	76.8	5.9	10.8	n.d.	19.0	19.5	n.a.	47.9
AC2 (ft) +	42.3	9.0	330	73.0	1.1	2.6	n.d.	0.22	79.9	6.1	9.4	n.d.	19.8	18.3	n.a.	50.9
Poço Quente (nt) +	22.9	6.7	341	43.0	2.7	19.8	3.5	0.14	68.5	n.d.	45.1	8.1	24.4	4.7	n.d.	42.2
Poço Quente (nt) *	22.6	6.7	336	32.0	2.7	15.0	4.3	0.14	67.1	n.d.	51.6	6.4	21.3	4.9	n.d.	45.6
Outeiro (n) +	16.4	7.7	365	31.0	2.9	34.4	0.5	0.06	82.8	n.d.	63.9	5.2	27.1	4.0	n.d.	30.4

Notas – Concentrações em mg/L. T é a temperatura de emergência (°C). O pH e a condutividade eléctrica (Condutividade eléctrica em µS/cm) foram determinados *in-situ*. n.d. significa não detectado (abaixo do limite de detecção do aparelho); n.a. significa não analisado; (nt) nascente termal; (ft) furo termal; (n) nascente normal. (+) Campanha de Abril de 1999. (\*) Campanha de Setembro de 1999.

Tabela 1. Características físico-químicas de águas termominerais e águas subterrâneas normais do sector de Granjão-Caldas do Moledo.

Ref <sup>a</sup>	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$^3\text{H}$
Lameira 30 (nt) +	-6.95	-42.7	0.6
Fresca (nt) +	-6.81	-42.7	0.9
AC1 (ft) +	-7.00	-40.9	0.1
AC2 (ft) +	-6.98	-42.7	n.d.
Poço Quente (nt) +	-5.67	-36.9	4.4
Poço Quente (nt) *	-5.73	-35.4	6.4
Outeiro (n) +	-6.26	-38.2	11.7

**Notas** -  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  em ‰ vs V-SMOW.  $^3\text{H}$  em TU.

n.d. significa não detectado. (nt) nascente termal;

(ft) furo termal; (n) nascente normal.

(+) Campanha de Abril de 1999.

(\*) Campanha de Setembro de 1999.

Tabela 2. Composição isotópica das águas termais e normais da área das Caldas do Moledo.

facto, conforme podemos observar através da análise da tabela 1 e dos diagramas de Stiff e Piper da figura 4, as águas da nascente Poço Quente apresentam algumas características químicas (e.g., concentração em K, Ca, Mg,  $\text{SO}_4$  e Cl) semelhantes às águas da nascente termal Fresca (Caldas do Moledo). Conforme referido por MARQUES *et al.* (2003), as águas da nascente termal Fresca apresentam leves indícios de contaminação antrópica. Segundo MARQUES *et al.* (2003), na área em estudo, as águas normais que apresentam maiores concentrações em K, Ca e Cl, são igualmente caracterizadas por valores de  $\text{SO}_4$  e  $\text{NO}_3$  elevados (as águas da nascente Outeiro são um bom exemplo desta tendência). Tal facto não é de estranhar dado que o K, Ca, Cl,  $\text{SO}_4$  e  $\text{NO}_3$  são os principais componentes dos fertilizantes e pesti-

cidas utilizados na região para fins agrícolas (cultura da vinha) relacionados com a produção do Vinho do Porto.

#### Assinaturas isotópicas ( $^{18}\text{O}$ , $^2\text{H}$ e $^3\text{H}$ )

A geoquímica isotópica apresenta-se como uma ferramenta hidrológica extremamente importante para, conjuntamente com a informação proveniente de outras áreas de investigação (e.g., geoquímica convencional, geologia, geomorfologia e tectónica), possibilitar a elaboração de um modelo hidrogeológico consistente, o qual constitui a base para o planeamento de futuras campanhas de pesquisa e captação, assim como para a elaboração de planos de desenvolvimento de qualquer recurso hidromineral. Os isótopos ambientais podem, igualmente, contribuir para a resolução de questões ligadas à

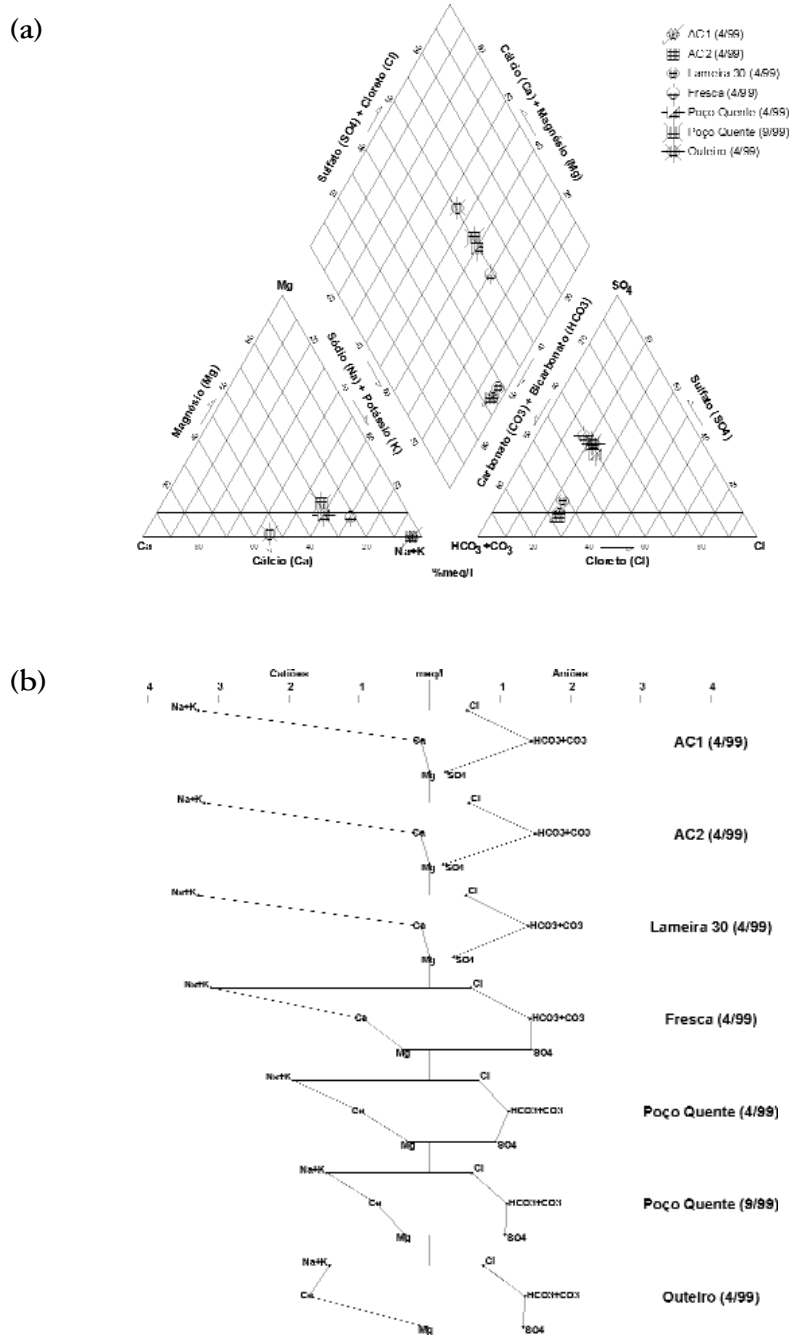


Figura 4. Diagramas de Piper (a) e de Stiff (b) de algumas águas subterrâneas do sector de Granjão-Caldas do Moledo.

exploração sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, nomeadamente no que respeita à utilização cuidada e à protecção deste tipo de georrecurso (envolvendo quer a quantidade quer a qualidade de água utilizada). Por exemplo, o conhecimento dos processos de recarga das águas termominerais é extremamente importante para a prevenção da deterioração da sua qualidade causada pela poluição.

Os isótopos ambientais mais utilizados são o oxigénio-18 ( $^{18}\text{O}$ ), o deutério ( $^2\text{H}$ ) e o trítio ( $^3\text{H}$ ). Os dois primeiros isótopos (estáveis) são utilizados como traçadores naturais em problemas relacionados com a origem das águas e com os respectivos sistemas de fluxo subterrâneo, enquanto que o isótopo radioactivo ( $^3\text{H}$ ) é utilizado em questões relacionadas com a dinâmica dos sistemas de fluxo subterrâneo e, conjuntamente com os isótopos estáveis, pode ter um papel importante na avaliação da existência de mistura entre águas profundas e águas meteóricas de infiltração recente.

Procura-se demonstrar a aplicabilidade das técnicas da geoquímica isotópica na resolução de questões de índole hidrogeológica. Esta forma de abordar a questão pretendeu possibilitar a identificação das potencialidades (e limitações) da utilização das técnicas isotópicas na resolução de problemas específicos. É de salientar o facto de as técnicas isotópicas poderem proporcionar uma abordagem independente na resolução de determinado problema hidrogeológico. No entanto, devemos estar conscientes de que estas técnicas são apenas uma das inúmeras ferramentas hoje disponíveis, e a sua utilização em paralelo com outras disciplinas foi, certamente, bastante mais proveitosa.

Neste capítulo, e recorrendo à utilização conjunta da geoquímica convencional e isotópica, abordar-se-á a possibilidade de as águas termais do Poço Quente serem encaradas como manifestações superficiais de um sistema hidrogeológico caracterizado por um processo de mistura entre águas termominerais (tipo Caldas do Moledo) e águas normais da região. A aplicabilidade dos isótopos ambientais ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  e  $^3\text{H}$ ) como traçadores do fluxo de águas subterrâneas, e a sua sensibilidade a processos tais como a evaporação, a mistura e diluição torna-os excelentes indicadores dos fenómenos geoquímicos.

Conforme se pode observar através da análise da figura 5, os valores  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  das águas termais do Poço Quente projectam-se sobre a recta das águas meteóricas mundiais ( $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ ) definida por CRAIG (1961), indicando tratar-se de águas meteóricas que sofreram um processo de infiltração rápido no subsolo. Não se observa qualquer desvio na composição isotópica destas águas que sugira a existência de qualquer fenómeno de evaporação ou de interacção água-rocha a temperaturas muito elevadas ( $> 80^\circ\text{C}$ ).

Ao compararmos a composição isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ) das águas termais do Poço Quente com a composição isotópica das águas termominerais das Caldas do Moledo (figura 5) podemos concluir que as águas termais do Poço Quente apresentam-se enriquecidas em isótopos pesados (valores  $\delta$  menos negativos), podendo esta tendência ficar a dever-se a:

- i) diferentes altitudes de recarga,
- ii) mistura com águas meteóricas locais,
- iii) um efeito paleoclimático.



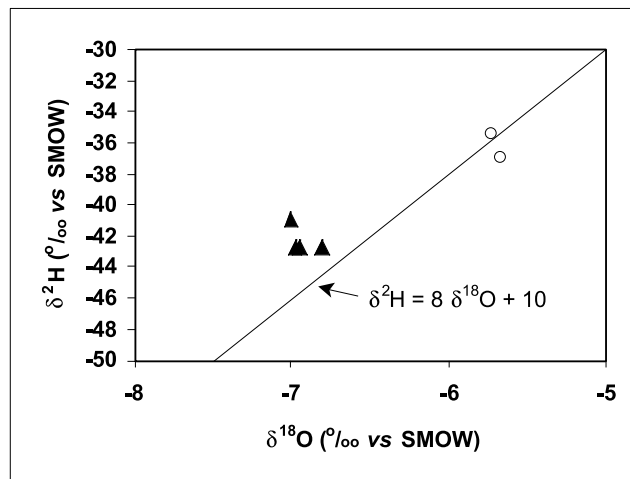


Figura 5. Diagrama  $\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$ . (○) águas termominerais das Caldas do Moledo; (▲) águas termais do Poço Quente.

MARQUES *et al.* (2000b) determinaram o *efeito de altitude* na região em estudo, através da composição isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$ ) de águas normais amostradas em nascentes localizadas na área envolvente das Caldas do Moledo e nas zonas montanhosas circundantes (figura 6). Utilizando a recta de regressão linear traçada pelos pontos amostrados (figura 6) é possível concluir que a composição isotópica das águas termais do Poço Quente ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{médio}} = -5.7\text{‰}$ ) aparenta corresponder a águas meteóricas infiltradas em pontos de cota baixa ( $\approx 125\text{m}$ ). Esta altitude de recarga é próxima da altitude de emergência das águas do Poço Quente (*ca.* 80m).

Através da análise do diagrama da figura 7a (Cl vs  $^3\text{H}$ ), as águas termais do Poço Quente (B), caracterizadas por valores  $^3\text{H}$  consideráveis, encontram-se projectadas entre dois extremos (A) e (C) de uma possível recta de mistura: (A) águas termominerais das Caldas do Moledo

(furos AC1 e AC2; nascentes Lameira 30 e Fresca), (C) água normal local (nascente de Outeiro, a qual se situa a *ca.* 160m de altitude).

No entanto, esta tendência de mistura não é observada nos diagramas da figuras 7b e 7c. Conforme podemos observar, as águas termais do Poço Quente não apresentam valores  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  compatíveis com este modelo de mistura. A haver mistura, a composição isotópica das águas normais locais (representada pela nascente Outeiro) deveria apresentar valores  $\delta^{18}\text{O}$  da ordem de  $-4.5\text{‰}$ . Tais valores não são compatíveis com o *efeito de altitude* encontrado na região (figura 7), o qual é condicionado por factores climáticos locais.

Deste modo, as águas termais do Poço Quente devem ser encaradas como estando associadas a um sistema hidrogeológico distinto do das Caldas do Moledo, caracterizado por recarga e circulação local. Os valores de  $^3\text{H}$  e Cl apresentados

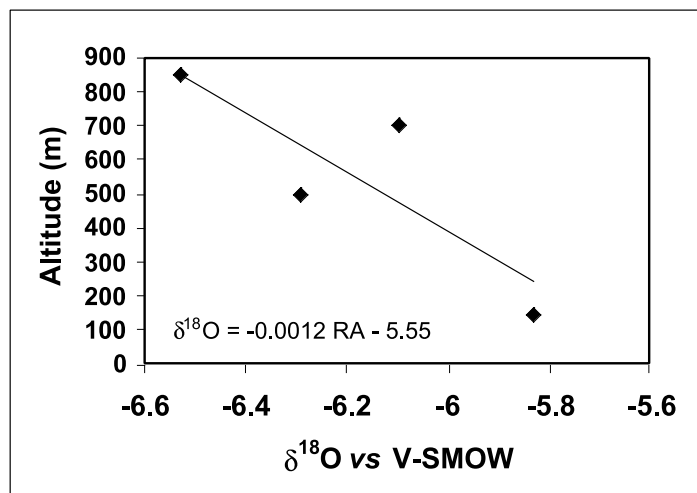


Figura 6. Relação dos valores  $\delta^{18}\text{O}$  com a altitude dos locais de amostragem (segundo MARQUES *et al.*, 2000b). (v) águas subterrâneas normais locais.

pelas águas termais do Poço Quente requerem: i) uma circulação relativamente mais profunda que a das águas normais locais (para explicar o decaimento do  $^3\text{H}$ ) e ii) que a interacção água-rocha seja igualmente dominada pela presença de rochas metassedimentares locais (para explicar os valores de Cl).

Uma explicação alternativa para a diferença encontrada na composição isotópica das águas termominerais das Caldas do Moledo e do Poço Quente poderia ser um efeito paleoclimático. Segundo IAEA (1983) paleoáguas são águas relacionadas com ciclos hidrológicos associados a condições ambientais diferentes das actuais. Os aquíferos recarregados no decorrer dos episódios pluviais ocorrentes em condições ambientais mais frias e húmidas são caracterizados por valores  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  mais negativos, quando comparados com a composição

isotópica da precipitação actual (IAEA, 1983). Por um lado, as águas termais do Poço Quente apresentam valores de  $^3\text{H}$  consideráveis indicando recarga actual (posteriormente aos primeiros ensaios termonucleares), enquanto que as águas termominerais das Caldas do Moledo (furos AC1 e AC2) são caracterizadas pela ausência de  $^3\text{H}$  muito baixos e por uma idade aparente da ordem dos  $15.66 \pm 2.86 \times 10^3$  anos, estimada com base nos valores de  $^{14}\text{C}$  e  $\delta^{13}\text{C}$  determinados no carbono total inorgânico dissolvido (MARQUES *et al.*, 2003). De referir que, quer as águas termais do Poço Quente quer as águas termominerais das Caldas do Moledo apresentam composição isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ) semelhante à das águas meteóricas actuais da região (MARQUES *et al.*, 2003), pelo que a possibilidade de existência de um efeito paleoclimático não nos parece muito plausível.

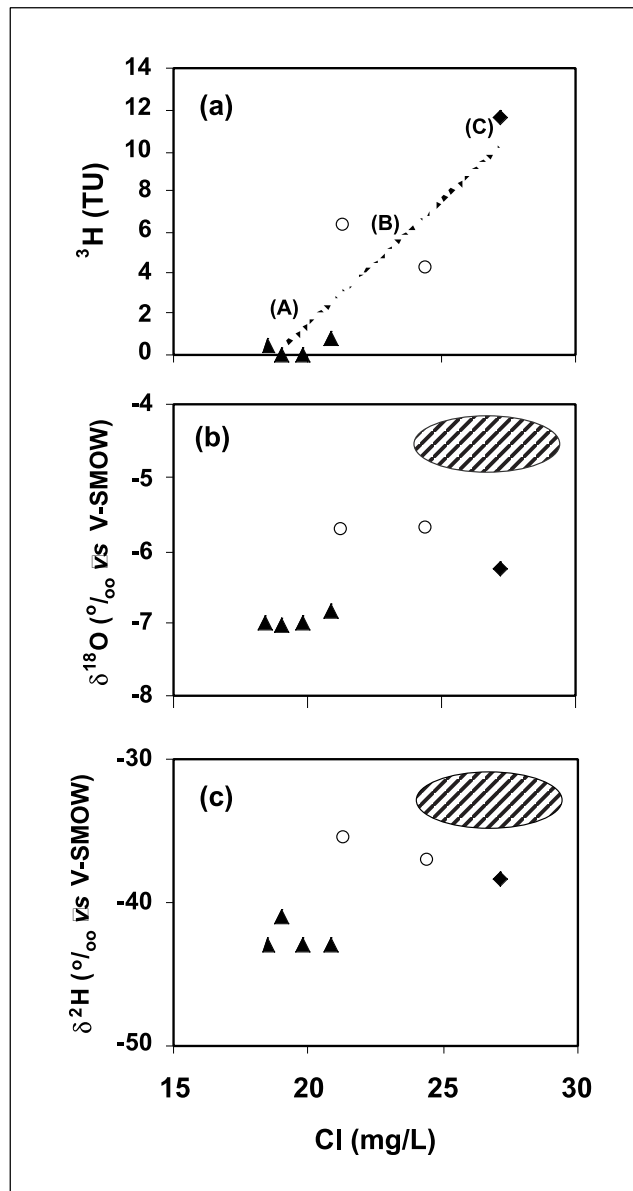


Figura 7. Relações  $^3\text{H}$  vs Cl (a),  $\delta^{18}\text{O}$  vs Cl (b) e  $\delta^2\text{H}$  vs Cl (c) para as as águas em estudo. (σ) águas termominerais das Caldas do Moledo; (u) águas termais do Poço Quente; (v) águas subterrâneas normais locais. A tracejado apresentam-se os domínios correspondentes às águas subterrâneas normais locais, compatíveis com um hipotético modelo de mistura.

## UM MODELO CONCEPTUAL DE CIRCULAÇÃO

Os resultados dos estudos geológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos realizados na área do Granjão–Caldas do Moledo tornaram possível a elaboração de um modelo hidrogeológico conceptual associado às águas termais do Poço Quente. Este modelo é baseado na interpretação dos resultados provenientes da abordagem multidisciplinar adoptada.

De acordo com o modelo delineado, a ocorrência da nascente termal do Poço Quente é fortemente condicionada pelo seu enquadramento geotectónico, especialmente no que respeita, à existência de um nó tectónico definido pelas principais descontinuidades estruturais localmente presentes, as quais incluem o contacto litotectónico entre as rochas granitóides e as rochas metassedimentares.

A circulação hidromineral nas zonas de recarga e de descarga faz-se, fundamentalmente, através de rochas metassedimentares. Os estudos geológicos e tectónicos regionais permitem colocar a hipótese de a circulação hidromineral ser, ainda, controlada por rochas filonianas (aplitopegmatíticas e/ou pegmatíticas). O reservatório estará, provavelmente, instalado em rochas graníticas, tais como o granitóide de Cidadelhe, agora reconhecido e cartografado. Esta hipótese surge, igualmente, quando se consideram as características químicas destas águas, bastante semelhantes às que ocorrem em aquíferos graníticos noutros sistemas hidrominerais, na zona de falha de Régua–Verín.

Os dados hidrogeoquímicos (valores de Cl) e isotópicos (valores  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ) sugerem que a possibilidade de ocorrência de

mistura entre águas termominerais de circulação profunda e águas subterrâneas normais locais deverá ser encarada com algumas restrições.

Por outro lado, os resultados isotópicos ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ) apontam para o facto de as águas termais do Poço Quente resultarem de águas meteóricas locais infiltradas em pontos de cota baixa, relativamente próximos da zona de emergência. Deste modo, o percurso subterrâneo deverá ser relativamente profundo e demorado, por forma a explicar a menor actividade em  $^3\text{H}$  apresentada por estas águas termais, comparativamente às águas normais locais.

O quadro 1 apresenta uma comparação entre diversos sistemas hidrominerais do Norte de Portugal: Poço Quente, Caldas do Moledo, Caldas do Carlão, Caldas de S. Lourenço e Caldas de Aregos (figura 8). Para tal efeito, consideraram-se as litologias ocorrentes na zona de descarga, o enquadramento tectónico, a temperatura máxima registada nas emergências termominerais e o quimismo dos respectivos fluidos. Constata-se que o sistema hidrogeológico do Poço Quente é mais semelhante aos restantes no que respeita ao enquadramento geotectónico do que quanto ao quimismo dos fluidos termominerais.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu apresentar um quadro morfoestrutural e hidrogeológico actualizado do sector do Granjão–Caldas do Moledo, bem como tecer as principais implicações do mesmo sobre o sistema hidrogeológico do Poço Quente.

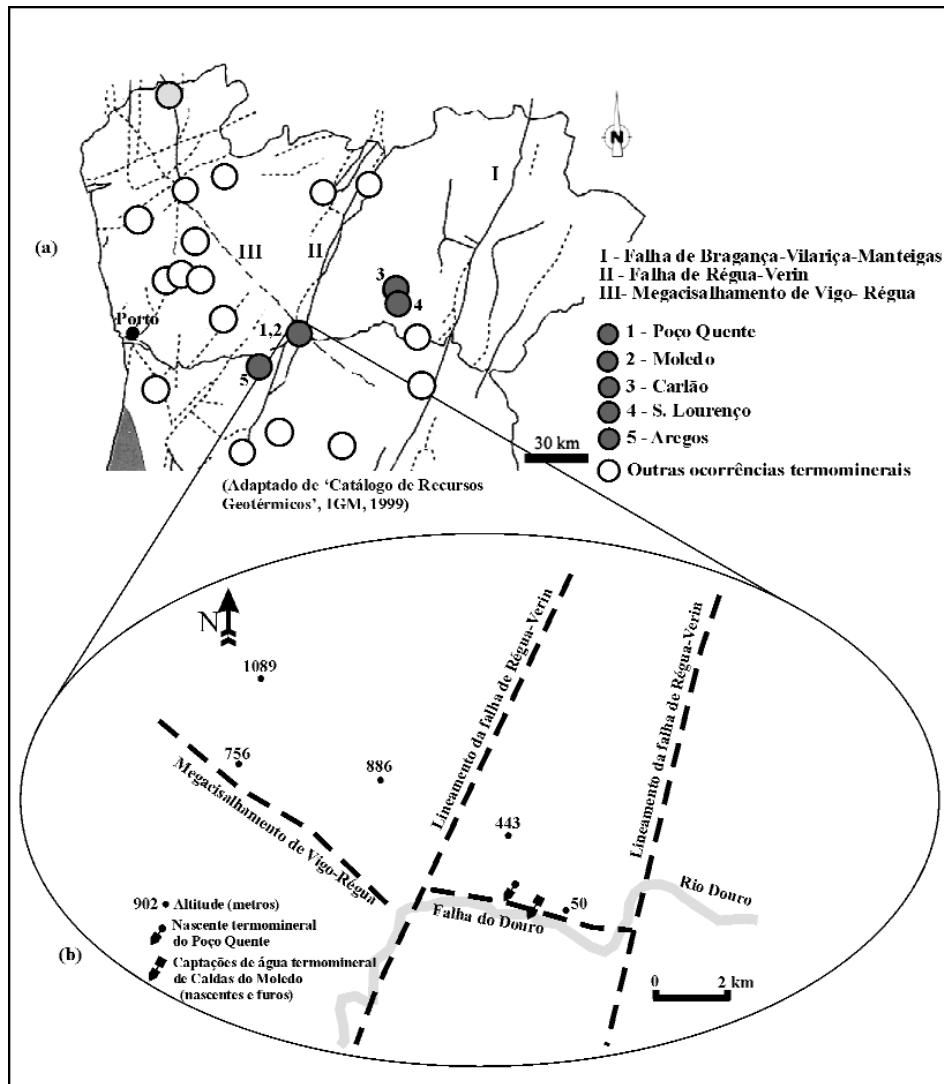


Figura 8. Principais ocorrências de águas termominerais no Norte de Portugal (a) e enquadramento geotectónico do sector de Granjão-Caldas do Moledo (b) (adaptado de ESPINHA MARQUES *et al.*, 2001a).

As investigações relacionadas com as águas termais do Poço Quente têm vindo a ser efectuadas no contexto do desenvolvimento de um modelo conceptual para este sistema hidrogeológico (MARQUES *et al.*,

2003; ESPINHA MARQUES *et al.*, 2001b, *in press*), modelo este que se tem vindo a aperfeiçoar à medida que informação adicional vai sendo obtida. Cada fase de investigação tem envolvido um deter-

Sistema hidromineral	Litologias	Enquadramento tectónico	Temperatura máxima registada	Quimismo do fluido termomineral
1. Poço Quente	Rochas metassedimentares (CXG), Granito de Cidadelhe e filões apitopegmatíticos	Domínio das Falhas de Régua-Verin e de Vigo-Régua; descontinuidades NNE-SSW a NE-SW e NW-SE a WNW-ESSE; contacto entre rochas metassedimentares e rochas graníticas.	22,9°C	HCO <sub>3</sub> , Na, SO <sub>4</sub>
2. Caldas do Moledo	Rochas metassedimentares (CXG) e filões apitopegmatíticos	Domínio das Falhas de Régua-Verin e de Vigo-Régua; descontinuidades NNE-SSW a NE-SW e NW-SE a WNW-ESSE; contacto entre rochas metassedimentares e rochas graníticas (em profundidade).	45°C	H <sub>2</sub> S, HCO <sub>3</sub> , Na, F
3. Caldas do Carlão	Rochas metassedimentares (CXG), granitóides alcalinos, de duas micas, com turmalina, filões apitopegmatíticos e filões de quartzo.	Domínio entre a Falha de Bragança-Vilarçã-Manteigas e a Falha de Régua-Verin; contacto entre xistos e granitos, sistemas de descontinuidades NNE-SSW e NW-SE.	31°C	H <sub>2</sub> S, HCO <sub>3</sub> , Na, F
4. Caldas de S. Lourenço	Rochas da série tonalito-granito, corneanas, filões de quartzo.	Domínio entre a Falha de Bragança-Vilarçã-Manteigas e a Falha de Régua-Verin; sistemas de descontinuidades NE-SW e NW-SE.	30°C	H <sub>2</sub> S, HCO <sub>3</sub> , Na, K
5. Caldas de Aregos	Granodiorito e granito biotítico	Domínio a oeste da falha de Régua-Verin; intersecção entre a Falha de Aregos (NW-SE) e o sistema de descontinuidades NNE-SSW.	62°C	H <sub>2</sub> S, HCO <sub>3</sub> , Na, F

Quadro 1. Principais características de alguns sistemas hidrominerais do Norte de Portugal (dados extraídos de CARVALHO, 1996a, b; IGM, 1999; MARQUES *et al.*, 2000a, b; ESPINHA MARQUES *et al.* 2001a,b).

minado número de operações para obter, processar e interpretar os dados de campo e de laboratório, com pormenor correspondente ao grau de conhecimento alcançado.

O modelo hidrogeológico conceptual proposto para as águas termais do Poço Quente, aponta para um forte controlo morfoestrutural desta nascente. A sua ocorrência está claramente associada a um nó tectónico definido por descontinuidades subparalelas às grandes estruturas regionais (a falha de Régua-Verin e o megacisalhamento Vigo-Régua) e, adicionalmente, à falha do Douro e às superfícies de contacto (frequentemente tectónicas) entre as rochas metassedimentares do CXG e as rochas ígneas (granito de Cidadelhe e filões aplitepegmatíticos associados).

O fluxo da recarga e da descarga deste sistema hidrogeológico ocorre, fundamentalmente, através de descontinuidades existentes nas rochas metassedimentares ou através de estruturas litotectónicas associadas ao contacto, já referido, entre rochas granitóides e metassedimentares. Por sua vez, o reservatório do sistema está instalado em rochas granitóides (*e.g.*, granito de Cidadelhe).

As assinaturas geoquímicas e isotópicas das águas termais do Poço Quente foram utilizadas por forma a compreender a origem destas águas, as potenciais áreas de recarga e o sistema de fluxo subterrâneo. As diferenças geoquímicas e isotópicas encontradas entre as águas termais do Poço Quente e as águas termominerais das Caldas do Moledo levam-nos a colocar a hipótese de estarmos na presença de sistemas hidrogeológicos distintos, sem conectividade em profundidade. Os valores  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  das águas termais do Poço

Quente apontam para altitudes de recarga inferiores às das águas das Caldas do Moledo. Os valores de  $^3\text{H}$  associados às águas termais do Poço Quente, mais elevados que os associados às águas termominerais das Caldas do Moledo deverão ser encarados como o resultado de um percurso subterrâneo mais curto e menos demorado. A possibilidade de as águas termais do Poço Quente poderem ser o resultado de mistura entre águas profundas e superficiais parece ser de excluir. Os valores  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  associados às águas termais do Poço Quente não são compatíveis com este modelo de mistura.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Junta de Turismo de Caldas do Moledo-Régua por toda a disponibilidade demonstrada. Este estudo recebeu apoio do Centro de Geologia da Universidade do Porto, do projecto MODELIB/ FCT (POCTI/ 35630/ CTA/ 2000- FEDER) e de uma bolsa de pós-graduação (SFRH/BPD/ 3641/ 2000, Aveiro) para HIC. Aos Drs. Eduardo Carvalho, Carla Ribeiro, José Teixeira e Cristiano Veloso pelo apoio na execução das ilustrações. As trocas de impressões sobre a temática com os Professores J. A. Simões Cortez (FEUP, Porto) e L. C. Gama Pereira (FCTUC, Coimbra) foram fundamentais para consolidar algumas ideias expressas neste trabalho. Agradece-se à Dra. Maria José Afonso (ISEP, Porto) a leitura crítica ao manuscrito original.

*Recibido:* 7-VII-03

*Aceptado:* 20-VIII-03

## REFERÊNCIAS

- ACCIAIUOLI, L.M.C. (1949/50). *Bibliografia hidrológica do império Português*. Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos. 2 volumes. Lisboa. (I volume, 1949, 445 pp.; II Volume, 1950, 441 pp.).
- ACCIAIUOLI, L.M.C. (1952/53). *Le Portugal hydro-mineral. Direction Générale des Mines et des Services Géologiques*. 2 volumes. Lisbonne. (I volume, 1952, 284 pp.; II Volume, 1953, 574 pp.).
- ALMEIDA, A. & ALMEIDA, J. (1970). *Inventário hidrológico de Portugal*. Instituto de Hidrologia de Lisboa. 639 pp
- 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, N° 10-D (Alijó)*, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 59 pp.
- BITZER, K.; TRAVÉ, A & CARMONA, J. M. (2001). Fluid flow processes at basin scale. *Acta Geologica Hispanica*, Barcelona, 36 (1/2): 1-20.
- BRUM FERREIRA, A. (1978). Planaltos e montanhas do Norte da Beira: estudo de geomorfologia. *Mem. Centro. Estud. Geogr.*, Lisboa, 4: 1-374. (Tese de doutoramento).
- 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. (2001). *A ocorrência de água sulfúrea alcalina no Maciço Hespérico. Quadro hidrogeológico e quimiogénese*. Universidade de Lisboa. 462 pp. (Tese de doutoramento).
- CALADO, C. M. A. (2003). Neotectónica e fluidos quentes de origem profunda no maciço Hespérico. *Ciências da Terra (UNL)*, Lisboa, N° Esp. V (CD-Rom): D14-D17.
- 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 24<sup>th</sup> Congr. Internat. Assoc. Hydrol.*, Oslo, Norway. 24 (1): 548-561.
- CARVALHO, J. M. (1996a). Mineral water exploitation and exploitation at the Portuguese Hercynian massif. *Environmental Geology*, 27: 252-258.
- CARVALHO, J. M. (1996b). Portuguese geothermal operations: a review. *European Geologist*, EFG. pp. 21-26.
- 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.
- CRAIG, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133: 1703-1703.
- EPSTEIN, S. & MAYEDA, T. (1953). Variation of <sup>18</sup>O content of waters from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 4, 213-224.
- 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.; CARVALHO, J. M. & SODRÉ BORGES, F. (*in press*). O sistema hidromineral de Caldas do Moledo, Peso da Régua (Norte de Portugal). *Cadernos Lab. Xeol. Laxe*, A Coruña, 2003.



- 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.
- FERNANDES, L. A. S. (1944). *Esbôço litológico da região Duriense*. Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos. 28 pp., 3 mapas.
- FERREIRA, N.; IGLÉSIAS, M.; NORONHA, F.; PEREIRA, E.; RIBEIRO, A. & RIBEIRO, M. L. (1987). Granitóides da Zona Centro-Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In: BEA, F.; CARNICERO, A.; GONZALO, J. C.; LÓPEZ PLAZA, M. & RODRÍGUEZ ALONSO, M. D., (eds.), *Geología de los granitóides y rocas asociadas del Macizo Hespérico* (Libro de Homenaje a L. C. García de Figuerola). Editorial Rueda, Madrid. pp. 37-51.
- FRIEDMAN, I. (1953). Deuterium content of natural waters and other substances. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **4**: 89-103.
- HENRIQUES, F. F. (1726). *Aquilégio Medicinal*. Lisboa Occidental, Na Oficina da Música. 309 pp. (Edição 'fac-similada', 1998, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa; apresentação de L. Rodrigues Costa e nota biográfica de Rita Marquilha).
- IAEA – International Atomic Energy Agency (1981). Stable isotope hydrology. *Deuterium and oxygen-18 in the water cycle*. IAEA-Vienna, Technical Reports Series, 210. Vienna.
- IAEA – International Atomic Energy Agency (1983) *Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology*. IAEA, Vienna, Technical Reports Series 91.
- IGM–Instituto Geológico e Mineiro (1999) - *Catálogo de recursos geotérmicos: Recursos Geotérmicos de Portugal Continental, versão 1.0, edição em CD-rom*. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.
- INGEBRITSEN, S. E. & MANNING, C. E. (1999). Geological implications of a permeability-depth curve for the continental crust. *Geology*, **27** (12): 1107-1110.
- INGEBRITSEN, S. E. & SANFORD, W. E. (1998). *Groundwater in geologic processes*. Cambridge University Press, New York, 341 pp.
- MACHADO, R. (1973). *As Caldas do Moledo: das suas origens à actualidade*. 22 pp.
- MARQUES, J. M.; AIRES-BARROS, L. & GRAÇA, R. C. (1998). Nota preliminar sobre a geoquímica isotópica das águas mesotermiais 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.; AIRES-BARROS, L. & GRAÇA, R. (2000a). Genesis of low-temperature sulphurous mineral waters (Northern Portugal): a geochemical and isotopic approach. In: *Proceedings of the World Geothermal Congress*, Kyushu-Tohoku, Japan, 1407-1412.
- MARQUES, J. M.; CARREIRA, P. M.; AIRES-BARROS, L.; GRAÇA, R. (2000b). Nature and role of CO<sub>2</sub> in some hot and cold HCO<sub>3</sub>/Na/CO<sub>2</sub>-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.
- MARTINS CARVALHO, P. S. (1969). Prospecção de água em formações cristalinas e cristalofílicas. *Bol. Minas*, Lisboa, **6** (1): 3-10.
- 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.
- OLIVER, J. (1986). Fluids expelled tectonically from orogenic belts: their role in hydrocarbon migration and other geologic phenomena. *Geology*, **14**: 99-102.
- RIBEIRO, A. & ALMEIDA, F. M. (1981). Geotermia de baixa entalpia em Portugal continental. *Geonovas*, *Associação Portuguesa de Geólogos*, Lisboa, **2**: 60-71.

- 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.
- SCHOELLER, H. (1962). *Les eaux souterraines*. Masson & cie, Paris. 642 pp.
- SCHOELLER, H. (1982). Sur les eaux thermominérales et leur origine. In: ROMARIZ, C., (ed.), *3ª Semana de Hidrogeologia*, Universidade de Lisboa. pp. 37-43.
- 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.