

**Caracterização da água termal da Ferraria (S. Miguel, Açores):
origem e evolução composicional**
**Caracterización de las aguas termales de Ferraria (S. Miguel, Azores): origen y
evolución de la composición**

M. Rosário Carvalho¹, António Mateus², João C. Nunes³, José M. Carvalho⁴

¹Geóloga (PhD), Prof. Auxiliar, Dep. Geologia e CeGUL, Faculdade Ciências da Universidade Lisboa, Ed.C6, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal, mdrcarvalho@fc.ul.pt

²Geólogo (PhD), Prof. Catedrático, Dep. Geologia e CeGUL, Faculdade Ciências da Universidade Lisboa, Ed.C6, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal, amateus@fc.ul.pt

³Geólogo (PhD), Prof. Auxiliar, Dep. de Geociências da Universidade dos Açores, INOVA, Rua da Mãe de Deus, Ponta Delgada, Açores, Portugal, jcnunes@uac.pt

⁴Geólogo (PhD), Prof. Auxiliar Conv., Dep. Eng. Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, jmc@tarh.pt

RESUMO

A água termal da Ferraria exsurge ao nível do mar com $T \approx 60^{\circ}\text{C}$; apresenta fácies cloretada sódica, elevada mineralização e $\text{pH} \approx 5,5$. A sua composição química e assinatura isotópica, bem como a simulação numérica realizada, indicam a presença de um fluido primário enriquecido em CO_2 com $T \approx 100^{\circ}\text{C}$ que desenvolve reacção ácida com as rochas, misturando-se com água do mar ($\approx 50\%$); a lixiviação promove enriquecimento em SiO_2 e metais. Os efeitos da circulação hidrotermal são evidentes a partir dos 18-19 m de profundidade, ocorrendo fases minerais neoformadas aos ≈ 25 m.

Palavras Chave

Água termal, hidrogeoquímica, origem fluidos, Ilha de S. Miguel, Açores.

RESUMEN

Las aguas termales de Ferraria exsurgen a nivel del 60°C , con facies de cloruro de sodio ca, alta mineralización y $\text{pH} \approx 5,5$. La composición química y su firma isotópica, bien como simulación numérica indican la presencia de un fluido primario enriquecido en CO_2 , con $T \approx 100^{\circ}\text{C}$, que desarrolla reacciones ácidas con las rocas, y se mezcla agua de mar (50%); lixiviación promueve el enriquecimiento en SiO_2 y metales. Los efectos de la circulación hidrotermal son evidentes desde el 18-19 m de profundidad, ocurriendo fases minerales neoformadas a los ≈ 25 m.

Palabras Clave

Agua termal, hidroquímica, origem fluidos, Ilha de S. Miguel, Açores.

INTRODUÇÃO

A água termal da Ferraria exsurge ao nível do mar no extremo W da ilha de S. Miguel, no seio das formações que constituem a fajã lávica da Ferraria no Complexo Vulcânico das Sete Cidades (fig. 1). Com temperatura de emergência em torno de 60°C , alimentou, em tempos, o hospital termal da Ferraria, edifício que se localiza próximo e que se encontra em estado de degradação avançada.

As características físico-químicas da água termal são conhecidas há longos anos, revelando-se compatíveis com uma mistura de fluido primário (profundo) com água do mar. Acciaiuoli (1953) realizou análises físico-químicas à água colhida num poço com 2,5 m de profundidade, local de captação para abastecimento do hospital termal; classificou-a como cloretada sódica com elevada mineralização (cerca de 20 g/L), registando a temperatura de $62,5^{\circ}\text{C}$.

Com o propósito de reabilitar o funcionamento das Termas da Ferraria, o Governo Regional dos Açores promoveu a execução de três furos (AC1, AC2 e AC3), os quais demonstraram a

existência de água com temperatura e caudal exploráveis para esses fins. O furo AC3, equipado para a captação e exploração encontra-se em ensaio e a água termal foi objecto de caracterização sistemática.

O presente trabalho reporta os resultados do estudo hidrogeoquímico realizado sobre a água termal da Ferraria captada no furo AC3 que, procurando contribuir para a caracterização do recurso geotérmico captado, deu especial atenção: (1) à avaliação do grau de mistura entre o fluido termal primário e água do mar; e (2) ao estabelecimento de um modelo conceptual de circulação da água termal. Nesta conformidade, as actividades desenvolvidas contemplaram: (i) amostragem de água termal no AC3, em altura de maré-baixa e alta, e realização de análises físico-químicas e isotópicas; (ii) amostragem dos testemunhos de sondagem (em arquivo) relativos aos furos AC1 e AC2 para análise mineralógica e química; (iii) modelação hidrogeoquímica, visando a determinação do grau de mistura do fluido termal com água do mar e o estudo da interacção fluido-rocha para apoio à definição do modelo conceptual do aquífero termal da Ferraria. A amostragem de água termal realizou-se em Abril e Outubro de 2008, período durante o qual o INOVA procedeu à recolha de amostras para monitorização mensal dos parâmetros físicos e químicos considerados críticos.



Figura 1. Enquadramento geográfico e vulcanoestratigráfico da água em estudo. A) Complexos Vulcânicos da Ilha de S. Miguel, Açores, (adaptado de Nunes, 2004); 1-Nordeste; 2-Povoação; 3-Furnas; 4-Fogo; 5-Picos; 6-Sete Cidades. B) Vista aérea do delta lávico da Ponta da Ferraria; localização dos furos AC1, AC2 e AC3 e nascente de água termal ("Nascente Ferraria").

ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

No extremo W da ilha de S. Miguel, as águas termais emergem no seio de fajãs formadas por escoadas lávicas basálticas (s.l.) que integram o Complexo Vulcânico das Sete Cidades e são controladas por estruturas tectónicas com direcção predominante NW-SE (orientação do Rift da Terceira e *graben* dos Mosteiros), NE-SW, N-S e E-W (Queiroz, 1990). A exurgência termal da Ferraria localiza-se na fajã lávica homónima (fig. 1). Outras nascentes termais, também localizadas no litoral, associam-se ao *graben* e fajã lávica de Mosteiros (fig. 1); estas apresentam características químicas semelhantes às de Ferraria, mas temperatura inferior (variando entre cerca de 30 a 43°C). No Vulcão das Sete Cidades não se observa qualquer emanação gasosa subaérea; contudo, emanações submarinas foram registadas ao largo da Ponta da Ferraria (informação popular) e Candelária (a S de Ferraria; *in* Ferreira, 1994).

O Vulcão das Sete Cidades, com idade inferida de 800 ka, é um dos quatro edifícios vulcânicos poligenéticos com caldeira reconhecidos na Ilha de S. Miguel. Apresenta diâmetro médio de 5,3 km, altura máxima de 2700 m (acima do nível do mar) e caldeira com profundidade máxima de

620 m (Nunes *et al.*, 2004); esta última é ocupada pelas Lagoas Verde e Azul. Os produtos vulcânicos que o compõem (Queiroz, 1990) incluem erupções basálticas *s.l.* (escoadas e piroclastos), traquíticos *s.l.* (escoadas, domas, depósitos de queda e depósitos de fluxo piroclástico, como ignimbritos, *surges* e *lahars*). As últimas erupções, distribuindo-se por 13 eventos, ocorreram intra-caldeira; manifestam natureza traquítica, bem como características explosivas e hidromagmáticas.

A Ponta da Ferraria é um delta lávico basalto *s.s.* constituído por escoadas emitidas a partir do Pico das Camarinhas (fig. 2). Revela espessura aproximada de 20 m e as suas interfaces superior e inferior são formadas por *clinker* (Carvalho *et al.*, 2009); a fluência da lava em direcção ao mar possibilitou o desenvolvimento de um pequeno cone piroclástico na superfície do delta – cone litoral (*pseudocrater*, fig. 2). As escoadas incluem abundantes xenólitos com composição mineralógica relativamente homogénea (plagioclase e anfíbola).

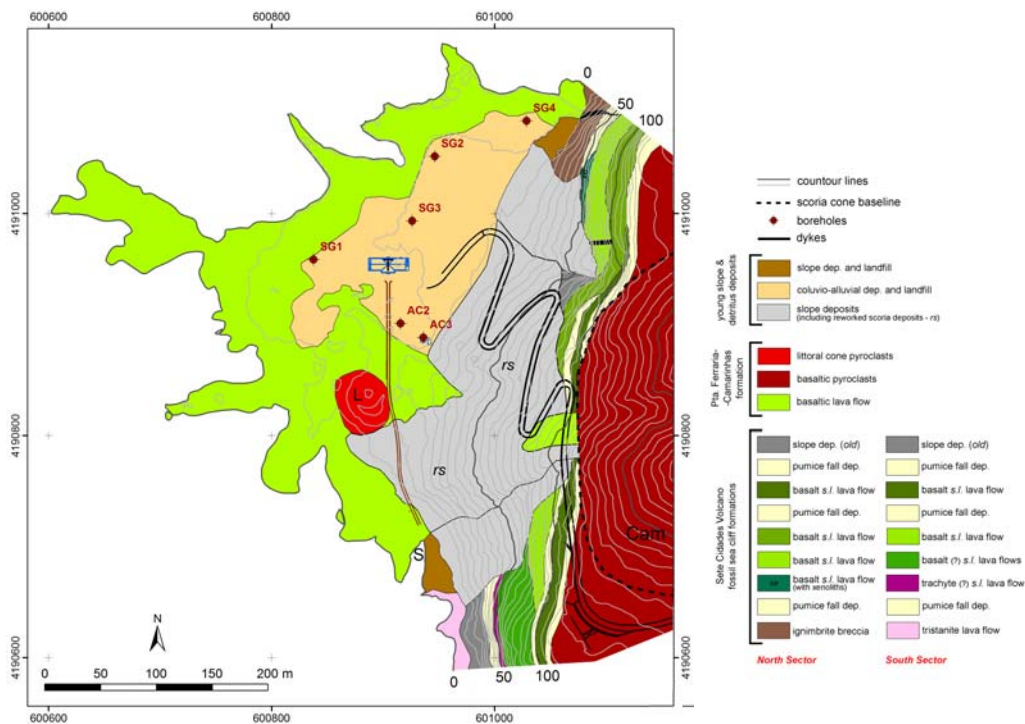


Figura 2. Mapa geológico da área de Ponta da Ferraria (adaptado de Nunes e Lima, 2009).

SONDAGENS AC1 e AC2

As sondagens AC1, AC2 e AC3 (figs. 1 e 2), cortando as escoadas da fajã lávica, foram realizadas com o objectivo de captar água termal. O exame macroscópico dos testemunhos de sondagem revela que as litologias intersectadas apresentam características muito semelhantes (predominando basaltos com microporosidade assinalável e heterogeneamente distribuída), não obstante se registarem variações (localmente consideráveis) dos efeitos imputáveis à alteração hidrotermal, os mais intensos invariavelmente associados a maior densidade de fracturação.

A sondagem AC1 atingiu a profundidade de 25 m (fig. 3). Até aos $\approx 10,80$ m não existem evidências macroscópicas para a circulação de águas termais nos basaltos vesiculares. Dos $\approx 10,80$ m aos 13,20 m, algumas das fracturas que cortam o basalto (maciço, com abundantes xenólitos e menos vesicular) apresentam indícios de ter servido como canal à circulação de

águas termais; estes indícios limitam-se ao desenvolvimento (muito heterogéneo) de orlas de descoloração ao longo das superfícies de fractura, as quais raramente se estendem para além de 1 cm. Dos 13,20 m aos 21,35 m, são notórios os efeitos decorrentes da circulação progressivamente mais intensa de águas termais nos basaltos maciços (com menos xenólitos e pouco vesicular); esta circulação é condicionada pela fracturação que tende a desenvolver uma rede razoavelmente interconectada; a densidade da rede de fracturas adquire particular expressão entre os 18 m e os 19 m de profundidade. Dos 21,35 aos \approx 24 m, a rocha basáltica (pouco vesicular) manifesta maior alteração (aparentemente pervasiva), incorporando associações minerais neoformadas que incluem zeólitos e sulfatos, para além de disseminações pouco significativas de pirite (parcialmente oxidada) e escassa clorite/esmectite. Dos \approx 24 m aos 25 m, a alteração (oxidante) manifestada pela rocha basáltica é bastante forte, conduzindo ao desenvolvimento de abundantes (hidr-)óxidos de ferro e jarosite(?).

A caracterização petrográfica das cinco amostras colhidas em AC1 (AM-I a AM-V – fig.3) permite concluir que os micrólitos de feldspato *s.l.* formam uma rede bem desenvolvida, cujos interstícios são preenchidos por grãos anédricos de piroxena (geralmente manifestando zonação óptica), olivina (nem sempre preservada), magnetite (grãos micro-milimétricos localmente muito abundantes, por vezes manifestando exsoluções lamelares de ilmenite) e, mais raramente, anfíbola; os (micro-)fenocristais de feldspato e de piroxena são escassos. Salvo um ou outro efeito óptico denunciador de oxidação incipiente (e muito localizada) da magnetite e de corrosão periférica dos grãos de feldspato, não se evidenciam quaisquer outras imputáveis a modificações mineralógico-texturais devidas a alteração hidrotermal. Em AM-II observa-se ainda um enclave constituído por agregados de grãos poiquilíticos/amibóides de feldspato, rodeados por um agregado de fina granularidade de anfíbola. Em AM-I identificam-se micro-grãos anédricos e tardios de pirite e calcopirite heterogeneamente distribuídos na matriz rochosa. Na amostra AM-III a granularidade da matriz é mais fina; os microfenocristais de feldspato e piroxena são mais abundantes, e os micrólitos de anfíbola mais comuns; registam-se ainda numerosos exemplos de orlas reaccionais entre os grãos maiores de feldspato (por vezes também de piroxena) e a matriz. A magnetite forma grãos anédricos (tendencialmente arredondados) com dimensão milimétrica (raramente micrométrica), coexistindo espacialmente com muitos outros grãos (sub-)micrométricos que, apenas localmente, revelam morfologia subeuédrica. Não se vislumbram lamelas de exsolução de qualquer tipo, nem efeitos ópticos denunciadores de oxidação da magnetite; também não existe qualquer evidência de alteração hidrotermal significativa dos silicatos; ocorrem, todavia, escassos grãos (sub-)micrométricos de pirite junto a magnetite, o maior deles revelando uma orla periférica de composição magnetítica. A natureza mineralógica da amostra AM-IV permite a sua classificação como traqui-basalto. Trata-se de uma rocha cuja matriz apresenta granularidade relativamente grosseira, essencialmente constituída por plagioclase e feldspato, contendo como fases acessórias anfíbola (bimodal em termos granulométricos) e magnetite; a biotite é escassa, assim como a piroxena. Os grãos de magnetite são maioritariamente submicrométricos e subeuédricos apresentando localmente morfologias esqueléticas denunciadoras de arrefecimento rápido; frequentemente, estas espinelas exibem evidências de oxidação intensa, conduzindo ao desenvolvimento de hematite ao longo dos seus bordos e fissuras intragranulares. As plagioclases de maior dimensão manifestam também evidências de hidrólise local e incipiente, conduzindo à formação de agregados secundários constituídos por moscovite fina e quartzo. O domínio rochoso representado pela amostra AM-V é bastante diferente dos reportados anteriormente, documentando a presença de cinzas vulcânicas razoavelmente consolidadas e profundamente alteradas por processos de hidrólise e de oxidação, os quais concorrem para a destruição quase total dos silicatos ferromagnesianos primários e acentuada degradação dos feldspatos *s.l.*; destacam-se então os micrólitos de feldspato (usualmente com bordos corroídos) no seio de uma matriz muito rica em hidróxidos de ferro mal cristalizados onde ainda é possível identificar espinelas primárias profundamente oxidadas (maghemite-hematite). Os macro- e microporos estão total ou parcialmente preenchidos por agregados concêntricos / botrioidais com crescimento polifásico (e, localmente

rítmico) predominantemente constituídos por hidróxidos de ferro relativamente ricos em Si, P e, localmente, em As (Carvalho *et al.*, 2009).

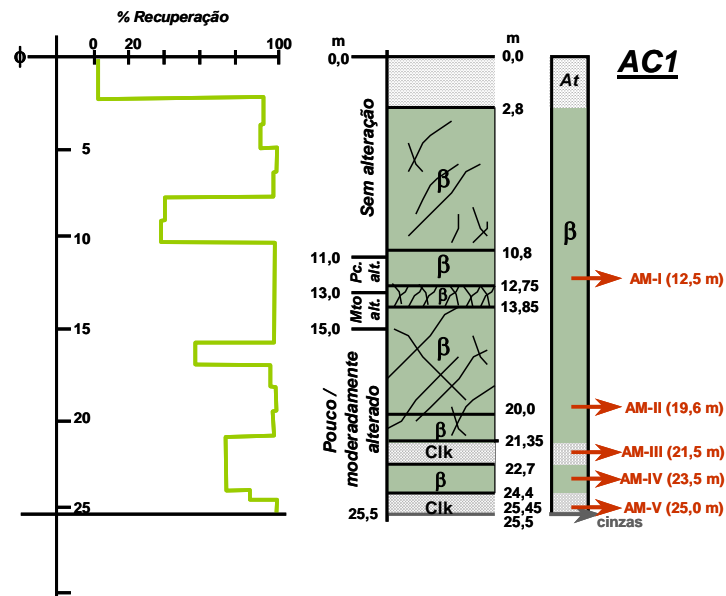


Figura 3. Log esquemático da sondagem AC1 e posicionamento das cinco amostras estudadas (com base de Nunes e adaptado de Carvalho & Mateus, 2008).

As características macroscópicas apresentadas pelas rochas intersectadas pela sondagem AC2 (fig. 4) não se revelam tão interessantes quanto as de AC1 no que diz respeito aos efeitos da alteração hidrotermal. Ainda assim, o estudo petrográfico de alguns exemplares (AM-VI a AM-X) revela um conjunto de informações que importa registar.

A amostra AM-VI representa uma rocha basáltica macro-porosa com evidências de alteração muito significativa, apresentando (micro-)fenocristais de piroxena e feldspato e, intersticialmente, olivina, anfíbola e minerais opacos; apenas localmente a olivina forma microfenocristais e, quando tal acontece, encontra-se rodeada por um agregado muito fino de piroxena e de titano-magnetite. Os minerais opacos são relativamente abundantes, os grãos maiores formando agregados milimétricos; trata-se de magnetite, ocasionalmente contendo exsoluções lamelares finas de ilmenite. Os micro-xenólitos observados são constituídos por plagioclase, piroxena e espinela (titanomagnetite e/ou ulvoespinela). A amostra AM-VII difere da anterior em algumas características consideradas distintivas. A magnetite é abundante e forma duas classes granulométricas, sendo a micrométrica a mais importante; esta é constituída por grãos subeuédricos que, localmente, coexistem com escassos grãos de pirite. A classe granulométrica grosseira de óxidos integra titano-magnetite com exsoluções lamelares de ilmenite, bem como grãos mistos de magnetite-ilmenite, os quais tendem a ocorrer preferencialmente no seio ou no bordo dos xenólitos (encraves); raros grãos de magnetite preservam no seu seio finas inclusões (com forma goticular) de pirite. A mineralogia silicatada é a usual neste tipo de rochas (plagioclase, piroxena, olivina, anfíbola), registando-se com frequência orlas de reacção nos domínios periféricos de plagioclase e piroxena; os (micro-)fenocristais observados são exclusivamente de plagioclase. Este tectossilicato é, aliás, a fase mineral predominante dos xenólitos, nos quais ocorrem embebidos numa matriz fina muito rica em piroxena e (titano-)magnetite. Nos xenólitos, a fracturação inter- e trangranular faz-se sentir com especial intensidade (mercê das condições reológicas propícias, em comparação com a envolvente basáltica), permitindo o crescimento tardio de precipitados férricos opticamente equivalentes aos reportados para AM-V, para além do desenvolvimento intersticial esporádico de calcite e, talvez, anidrite (ou gesso?); de notar que a formação dos precipitados férricos (preenchendo geralmente as paredes das cavidades ou fracturas) ocorre posteriormente à

deposição intersticial de carbonato (\pm sulfato). As amostras AM-VIII e AM-IX representam, por seu turno, uma rocha traquítica microporosa contendo raros microfenocristais de feldspato e plagioclase no seio de matriz feldspática relativamente rica em anfíbola (com rara piroxena). Estes dois últimos silicatos apresentam orlas de corrosão/alteração evidente, muito ricas em óxidos \pm clorite. Os óxidos primários (predominantemente magnetite) revelam evidências de oxidação moderada (seguindo os planos de partição octaédrica da espinela) a forte (particularmente evidente nos grãos de maior dimensão). A hidrólise manifestada pelos feldspatos é incipiente, apesar de serem relativamente comuns os aspectos devidos a crescimento zonado tardio destes tectossilicatos. A amostra AM-X representa uma brecha ignimbrítica incorporando fragmentos heterométricos de traquito variavelmente oxidado; a matriz é porosa e constituída por um agregado silicilástico muito fino; alguns dos poros encontram-se preenchidos por agregados zeolíticos; ocorrem ainda escassos fragmentos de fenocristais de natureza diversa (plagioclase, piroxena, anfíbola). Os óxidos desenvolvem-se em dois contextos texturais diferentes: no seio de litofragmentos traquíticos; e nas faixas de transição de alguns fragmentos para a matriz; em qualquer das circunstâncias, a (titano)magnetite predomina.

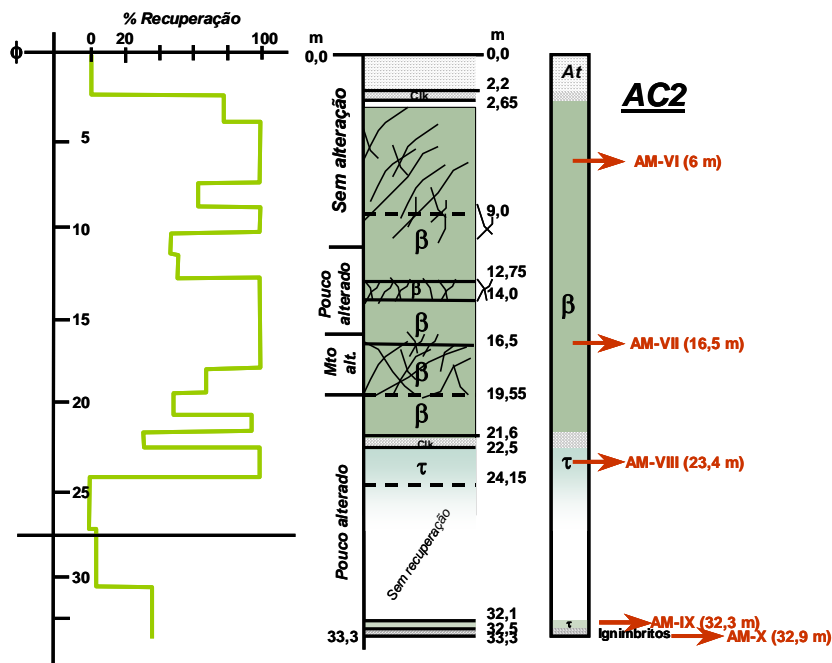


Figura 4. Log esquemático da sondagem AC2 e posicionamento das cinco amostras estudadas (base de Nunes, adaptado de Carvalho & Mateus, 2008).

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DA ÁGUA TERMAL; RESULTADOS E DISCUSSÃO

A água termal, com ≈ 60 °C, revela composição cloretada sódica e mineralização elevada (37 mS/cm de condutividade eléctrica), como resultado da mistura com água do mar; apresenta pH ligeiramente ácido ($\approx 5,5$) e H_2S total dissolvido em concentrações muito baixas ($<0,6$ mg/L, determinações *in situ*). A normalização dos valores de concentração elementar obtidos para a água termal em relação aos que tipificam a água do mar (fig. 5) permite colocar em evidência: (i) a diluição experimentada pelas espécies marinhas (Na, Cl, SO_4 , Mg); ii) a menor diluição dos conteúdos em Ca relativamente a outros catiões marinhos, denunciando contribuições da rocha hospedeira como consequência da sua alteração hidrotermal; (iii) enriquecimento acentuado em CO_2 total, sílica, Li, Mo, Mn, Al, Co, Rb, Cs, Tl e As, em boa medida também resultante da interacção água-rocha (para razões >1); e (iv) empobrecimento em Zn e Cd.

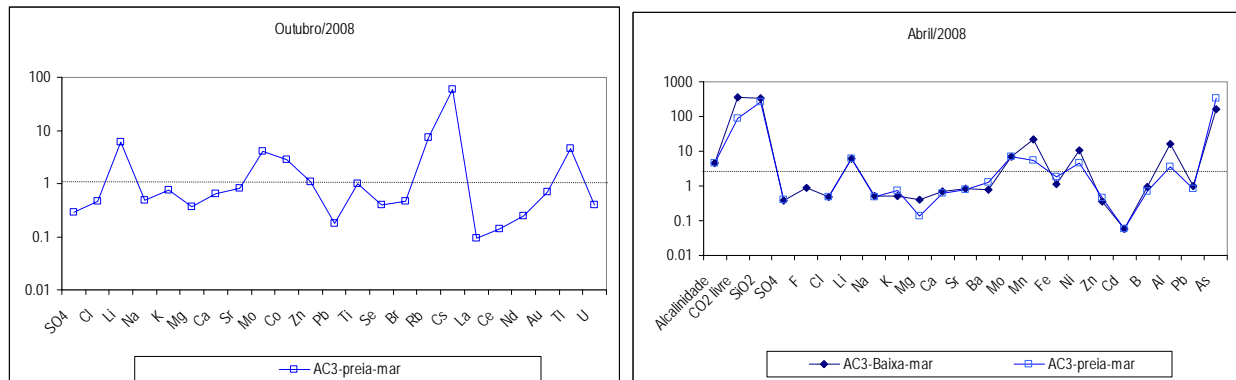


Figura 5. Água termal do AC3 amostrada em Abril/2008 e Outubro/2008, em maré baixa e preia-mar, normalizada em relação à água do mar.

A hipótese de a água termal da Ferraria corresponder a água do mar aquecida pelo gradiente geotérmico associado à Ponta de Ferraria (ou mais extenso, abrangendo o *graben* de Mosteiros) não se afigura plausível na medida em que o fluido termal captado no furo AC3 tem cerca de metade da mineralização da água do mar. Trata-se, pois, de uma mistura envolvendo água do mar e fluido termal (rico em CO₂) que se consubstancia no aquífero poroso/fracturado, descarregando através da fajã lávica.

A razão Na/Cl na água do mar (amostras recolhidas pelo INOVA junto à extremidade Oeste da fajã lávica, a 5 de Maio de 2008) e na água termal colhida em AC3 sugere que esta última é semelhante à primeira diluída em cerca de 50%. As razões Ca/Mg, Ca/SO₄ e Ca/Cl denunciam empobrecimento relativo da água termal em sulfatos (como consequência da sua precipitação) e magnésio (fixado em minerais secundários resultantes das reacções de hidrólise), para além de enriquecimento relativo em cálcio (em boa medida correspondente à fracção que, disponibilizada pelos processos de alteração hidrotermal, não foi incorporada nas fases minerais neoformadas).

A composição isotópica da água termal em AC3 (-4,17‰ δ²H e -1‰ δ¹⁸O) indica que esta poderá resultar de uma mistura composta por 77% de água do mar e 23% de um fluido termal profundo com composição isotópica -18‰ δ²H e -4,2 δ¹⁸O (fig. 5). Com esta proporção de mistura resulta uma água termal com cerca de 15.000 mg/L de cloretos dissolvidos (admitindo que a água do mar contém 19.600 mg/L), muito superior ao analisado em AC3 (9.650 mg/L). Considerando, contudo, a proporção de mistura indicada pelas razões Na/Cl (*i.e.* ≈ 50%), o fluido termal não modificado teria uma composição isotópica de -8,9‰ δ²H e -2‰ δ¹⁸O; estes valores aproximam-se dos reportados por Coutinho *et al.* (1996) para as águas das lagoas do Vulcão (-5,5‰ e -0,76‰, seguindo a mesma ordem). Todavia, aqueles valores de δ²H e δ¹⁸O podem ser justificados de outra forma. Por um lado, é possível obter um fluido de origem meteórica com composição isotópica equivalente (sempre mais pesado que a água de precipitação), bastando para o efeito que a água infiltrada em profundidade resulte da combinação das águas de precipitação com as retidas nas lagoas (fig. 5). Por outro, pressupondo que o fluido termal primário é essencialmente vapor, verifica-se que a composição isotópica -8,9‰ δ²H e -2‰ δ¹⁸O pode representar uma fase de vapor separada a ≈120°C da água do mar em ebulição. Tendo em conta os dados disponíveis, afigura-se plausível favorecer a última alternativa.

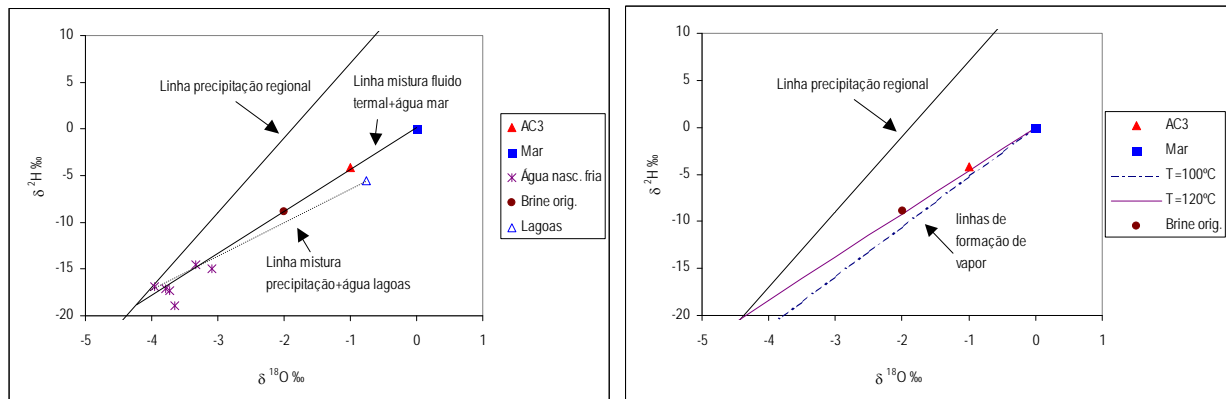


Figura 5. Diagramas de $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ com a representação da linha de mistura de água do mar incluindo a água termal colhido em AC3 e a composição isotópica do fluido termal primário (*brine*); (a) representação da linha de mistura de águas de precipitação e de lagoas do Vulcão das Sete Cidades; (b) representação das linhas de formação de vapor a partir da água do mar em ebulição.

A composição do fluido termal original, subsequentemente misturado com água do mar, foi simulado através do programa PHREEQC (Parkhurst e Appelo, 1999). O resultado da simulação que mais se aproxima da composição real foi obtido com a mistura de 47% de água do mar e 53% de água pouco mineralizada, rica em $\text{CO}_2(\text{g})$ e com $\text{pH} = 5$, à temperatura de 100°C . A composição simulada do fluido termal corresponderá a vapor hidrotermal misturado com gases de origem vulcânica (*brine*), nomeadamente CO_2 , que reage com a rocha hospedeira, solubilizando sílica, alumínio, cálcio, ferro, manganês e arsénio. Outros elementos devem ser remobilizados da rocha, sendo, no entanto, preferencialmente incorporados em minerais de neoformação.

Com base na simulação numérica, a composição química da rocha hospedeira é difícil de estimar, porquanto os enriquecimentos (Na, Ca, Al, Si, Mn e Fe) e empobrecimentos (Mg, Zn e Cd) relativos apresentados pelo fluido não convergem numa solução isenta de ambiguidade. O cálculo dos equilíbrios termodinâmicos do fluido em relação a diversas fases sólidas mostra ainda que o fluido está sobressaturado em óxidos de ferro, sílica e filossilicatos, podendo formar hematite, caulinite e quartzo (ou formas não cristalinas de sílica). O Mg e parte do Al e Fe lixiviados da rocha devem ficar retidos sob a forma de filossilicatos e (hidro-)óxidos de ferro.

Na simulação operada, a sílica resultante da lixiviação da rocha atinge valores de 317 mg/L. Se se tratasse de um fluido em equilíbrio, esta concentração corresponderia à dissolução de rocha no reservatório a cerca de 200°C . No entanto, tendo em consideração o pH e a concentração de $\text{CO}_2(\text{g})$, é expectável que a sílica dissolvida seja predominantemente devida ao ataque ácido do fluido, inviabilizando a sua utilização como geotermómetro.

CONCLUSÕES

A água termal da Ferraria apresenta composição cloretada sódica e elevada mineralização como resultado da mistura com água do mar; pH ligeiramente ácido e enriquecimento em $\text{CO}_2(\text{g})$ de origem profunda. O fluido termal primário, antes de se misturar com a água do mar na proporção de 50%, deverá corresponder a um *brine* ácido com temperatura em torno de 100°C , enriquecido em gases (nomeadamente CO_2), o qual interacciona com a rocha hospedeira conduzindo à sua alteração heterogénea.

O cálculo dos equilíbrios termodinâmicos do fluido em relação a diversas fases sólidas mostrou que este se encontra sobressaturado em óxidos de ferro, sílica e filossilicatos, podendo formar (hidro-)óxidos de ferro, caulinite e quartzo (ou formas não cristalinas de sílica). O Mg e parte do

Al e Fe lixiviados da rocha devem integrar fases neoformadas, nomeadamente filossilicatos e (hidr-)óxidos de ferro; estas fases minerais têm ainda capacidade para adsorver vários elementos (como o As e P), tal como se confirma pela análise detalhada de amostras colhidas de entre os testemunhos das sondagens AC1 e AC2.

Os testemunhos da sondagem AC1 mostram evidências claras de circulação de fluidos termais nos basaltos maciços (com menos xenólitos e pouco vesicular) entre os 13,20 m e 21,35 m de profundidade. Esta circulação é condicionada pela fracturação que tende a desenvolver uma rede razoavelmente interconectada (que adquire particular expressão entre os 18 m e os 19 m de profundidade), sugerindo a possibilidade deste nível corresponder ao “domínio mais externo” de escape de fluidos, especialmente durante eventos de depressurização do sistema hidrotermal.

AGRADECIMENTOS

São devidos agradecimentos ao INOVA (Instituto de Inovação Tecnológica dos Açores), através do contrato com a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, no âmbito do Projecto “Valorização de Águas Termais dos Açores”, financiado pelo Programa EU-PRODESA e o Governo Regional dos Açores (Secretaria Regional da Economia). Os autores agradecem ainda ao Projecto INOGAZ (PTDC/CTE-GIN/68851/2006) pela disponibilização dos dados isotópicos aqui reportados.

REFERÊNCIAS

- Acciaiuoli L.M.C. 1953. *Le Portugal hydromineral*. Vol. I e II. Direction générale des Mines et des Services Géologiques, Lisbonne, 574 pp.
- Carvalho, M.R. & Mateus, A. 2008. Caracterização do recurso geotérmico existente no pólo da Ferraria (S. Miguel, Açores). Relatório INOVA, Dez. 2008, 21 pp.
- Carvalho, M.R., Mateus, A., Nunes, J.C., & Carvalho, J.M. 2009. Controls on the Ferraria thermal water composition, S. Miguel Island, Azores. Proceedings “VII Congreso Ibérico e X Congreso Nacional de Geoquímica”, 21-22 Setembro, Soria, Espanha: 682-693, em CD-ROM.
- Coutinho, R., Carreira, P.M., Almeida, C., Monge Soares, A.M., Vieira, M.C.R., Carvalho, M.R. & Cruz, J.V. 1996. Estudo isotópico dos sistemas aquíferos do Maciço das Sete Cidades, S. Miguel – Resultados preliminares. *Recursos Hídricos*, 17, 25-32.
- Ferreira, T. (1994). *Contribuição para o estudo das emanações gasosas associadas a processos de vulcanismo no arquipélago dos Açores*. Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica. Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 183 p.
- Nunes, J.C. 2004. *Geologia*. In: FORJAZ, V.H. – *Atlas Básico dos Açores*. Observatório Vulcanológico e Geotérmico dos Açores (Ed). Ponta Delgada: 60-62.
- Nunes, J.C., França, Z., Forjaz, V.H., Macedo, R. & Lima, E.A. 2004. Poligenetic volcanoes of Azores archipelago (Portugal): size, nature, eruptive styles and related volcanic hazard. Abstract – “32nd International Geological Congress – Abstracts (part 1)”. Agosto. Firenze. Itália; p. 336.
- Nunes, J.C. & Lima, E.A. 2009. The “Ponta da Ferraria” lava delta geosite: scientific, educational, environmental, historical and economic (geotouristic) value. In: C.N. Carvalho e J. Rodrigues (Ed.), *Proceedings “8th European Geoparks Conference”*, Idanha-a-Nova, Geopark Naturtejo, 14-16. Setembro; 161-166. ISBN 978-972-8285-52-4.
- Parkhurst, D.L. & Appelo, C.A.J. 1999. *User’s guide to PHREEQC (version 2)-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. Water-Resources Investigations Report 99-4259. US. Geological Survey, Denver, Colorado.
- Queiroz, G. 1990. *Aspectos Vulcanológicos do Maciço das Sete Cidades*. Dissertação para Provas de Progressão na Carreira de Investigação, Centro de Vulcanologia/INIC/Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 148 pp.