

RETROSPECTIVA PETROGEOQUÍMICA DOS AÇORES. UMA PRIMEIRA APROXIMAÇÃO

AZORES PETROGEOCHEMISTRY RETROSPECTIVE. FIRST APPROACH

França, Z.^{1,2}, Rodrigues, B.³, Forjaz, V. H.^{1,2}

RESUMO

Este documento representa um percurso no tempo sobre os trabalhos, de índole petrogeoquímica, que um número significativo de investigadores tem desenvolvido sobre os Açores. O conhecimento mais profundo da realidade geológica deste arquipélago passa pela compreensão dos fenómenos que ocorrem no interior da Terra, dos processos magmáticos precursores dos eventos vulcânicos, causa última do surgimento dos Açores nesta região do Atlântico Norte. Neste contexto, a evolução das metodologias para atingir estes objectivos está bem patente nos conteúdos dos trabalhos que sequencialmente se rememorou. A diversificação de várias "ferramentas" geoquímicas e geofísicas, e a conjugação dos dados obtidos por essas vias, conduzem a uma visão mais clarificadora da realidade geológica. O conhecimento científico puro não constitui o único móbil de todas as obras enumeradas. Ele é tão mais significativo e importante quanto mais ele possa contribuir, como se vislumbra em alguns dos artigos aqui apresentados, para salvaguardar as populações dos Açores da perigosidade que está associada aos seus vulcões.

Os autores estão cientes que esta foi a aproximação possível, a um tema que consideram aliciante e importante para quem pretende desenvolver trabalhos desta índole no arquipélago dos Açores, face às condicionantes editoriais.

PALAVRAS-CHAVE: Açores, Petrogeoquímica, isótopos, pluma mantélica

ABSTRACT

The main goal of this paper is to remember many researches that developed petrogeochemistry investigations since settlement of Azores Islands. The geologic reality of this archipelago pass through inside Earth phenomena understanding, of precursor magmatic processes of volcanic events, last responsible by emergence of Azores islands on Atlantic North region. The evolution of the methodologies used to obtain that goals are obvious in different sequential works. The conjugation of geochemistry and geophysical data give a more clarify at geologic reality. Furthermore pure scientific knowledge imports contribute for assessment and prediction of volcanic hazard in sense to protect Azores population. Some papers appoint in this direction.

The authors consider that a general vision on all Azores geochemistry investigation developed until the present time is an important step for future researches; however, imperious more depth paper analysis was conditioned by editorial rules

1. INTRODUÇÃO

A partir de meados do século XV, altura em que ocorreu o povoamento dos Açores, assistiu-se a um crescente interesse pelas especificidades geovulcânicas do arquipélago, que desde sempre constituíram um desafio à compreensão de uma pléiade de intelectuais que ligaram e projectaram estas ilhas, durante várias épocas, para além do limite ilhéu e Atlântico. Entre os grandes vultos açorianos destaque-se Gaspar Frutuoso (séc. XVI), cronista, historiador, humanista e investigador de renome internacional que, com a sua obra "Saudades da Terra", deu a conhecer, sob várias vertentes, os Açores, a par de outros arquipélagos macaronésicos.

¹ Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, Rua Mãe de Deus, Ap. 1422, 9501 – 801 Ponta Delgada, Portugal; zfranca@notes.uac.pt, vforjaz@notes.uac.pt

² Observatório Vulcanológico e Geotérmico dos Açores.

³ Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810 – 193 Aveiro, Portugal; rbritaldo@netcabo.pt

No âmbito deste trabalho, Gaspar Frutuoso terá que ser considerado pioneiro na descrição de rochas do arquipélago. Posteriormente, muitos outros, englobando uma estirpe de naturalista de excepcional valor, tais como Webster 1821, Buch 1825, Bedemar 1837, Hartung 1860, Fouqué 1873, Darwin 1876, Mügge 1883, Canto e Castro, 1888, Lacroix 1893, para citar apenas alguns, enriquecem o património literário e científico arquipelágico. No entanto, só no século XX, com Esenwein (1929) é que surgem os primeiros trabalhos de investigação, de índole geoquímica, desenvolvidos sobre rochas do arquipélago dos Açores.

A evolução do saber em geral, e de forma particular o geológico, tem caminhado desde sempre lado a lado com o progresso tecnológico. Na realidade, este avanço reflecte-se, também nos Açores, principalmente a partir de meados dos anos 60 do século passado, sendo testemunhado através de um crescente número de trabalhos de investigação desenvolvidos no âmbito da Geologia/Vulcanologia. Objectivando-se fazer neste escrito uma abordagem ao estado de arte do conhecimento petrogeoquímico das ilhas açorianas procedeu-se, numa primeira aproximação, a uma evocação dos cientistas que através da sua investigação contribuíram para uma melhor compreensão da génese e evolução vulcanomagnética da região. Neste contexto, perfilmam-se: Berthois, 1953, Assunção 1961, Forjaz 1963, Baker 1966, Cann 1967, Assunção e Canilho 1969/1970, Schmincke e Weibel 1972, Girod e Lefèvre 1972, Self 1973, Schmincke 1973, Schilling 1975a,b, Flower *et al.* 1976, Monod e Varet 1976, Self e Gunn 1976, White *et al.* 1975, White *et al.* 1976, Fernandes 1977, White e Schilling 1978, White *et al.* 1979, Hawkesworth *et al.* 1979, Fernandez 1980, Fetter 1981, Widom 1991, Storey 1981 e 1982, Marriner *et al.* 1982, Storey *et al.* 1984, Chovellon 1982, Schmincke *et al.* 1982, Fernandez 1982, Demande *et al.* 1982, Lemarchand 1984, Benhamou e Lemarchand 1984, Fidczuk 1984, Feraud *et al.* 1984, Maund 1985, Rodrigues *et al.* 1985, Morisseau 1987, Lemarchand 1987, Rodrigues *et al.* 1989, Storey *et al.* 1989, Davies 1989, Tolstikhin *et al.* 1991, Widom *et al.* 1992, França 1993, Rodrigues *et al.* 1993, Widom *et al.* 1993, Almeida e Rodrigues 1993, França e Rodrigues 1993/4, Oskarsson *et al.* 1994, França e Rodrigues 1995, França *et al.* 1995a, Mungall e Martin, 1995, França *et al.* 1995b, Oskarsson *et al.* 1995, Rodrigues *et al.* 1996, Mungall e Martin, 1996, Bourdon *et al.* 1996, Widom e Shirey 1996, Turner *et al.* 1997, Kurz *et al.* 1997, Widom *et al.* 1997, Yu *et al.* 1997, Oskarsson *et al.* 1998, Moreira *et al.* 1999, Dosso *et al.* 1999, França 2000, Almeida 2001, Claude-Ivanaj *et al.* 2001, França *et al.* 2001, Rodrigues 2002, Schaefer *et al.* 2002, Moreira e Allègre 2002, Widom e Farquhar 2003, Ridolfi *et al.* 2003, França *et al.* 2003, Haase e Beier 2003, França e Laranjeira 2004, Cooper 2004, França 2005, França *et al.* 2005 a e b, Bourdon *et al.* 2005, Santos *et al.* 2005, Madureira *et al.* 2005, Widom 2006, França *et al.* 2006a, França *et al.* 2006b, França *et al.* 2006c, França *et al.* 2006d, Madureira *et al.* 2006, Beier 2006, Yang *et al.* 2006, Elliott *et al.* 2007, Lago *et al.* 2007, Nielsen *et al.* 2007, Snyder *et al.* 2007, Ribeiro *et al.* 2007a e b, Ribeiro *et al.* 2008, França *et al.* 2008, Madureira *et al.* 2008, Machado *et al.* 2008, Simon *et al.* 2008. É interessante referenciar que estes cientistas raramente focalizaram a globalidade das ilhas, incidindo maioritariamente sobre determinadas ilhas ou, em casos mais particulares, em complexos vulcânicos de algumas delas.

DISCUSSÃO

Conjugando os dados dos diversos autores procede-se a uma síntese de alguns dos trabalhos mais representativos, entre os demais citados, tentando caracterizar o arquipélago e a fonte ou fontes magnéticas, sob o ponto de vista petrogeoquímico. Neste entrosamento constata-se que as ilhas do arquipélago dos Açores são essencialmente basálticas, embora ocorram também, com menor representatividade, rochas de natureza ácida (Fig. 1). Ao invés do observável nas ilhas do Pico, São Jorge e Santa Maria, predominantemente constituídas por basaltos ou basaltos alcalinos picroíticos, as restantes ilhas apresentam uma litologia mais variada que se extende dos basaltos alcalinos picroíticos aos traquitos, englobando também havaítos e mugearitos (Self e Gunn 1976). A generalidade das rochas do arquipélago projecta-se no campo dos basaltos alcalinos, coexistindo, no entanto, algumas rochas que se inserem na área dos basaltos transicionais. Este facto foi constatado, por alguns investigadores, nomeadamente, Schmincke 1973, na ilha Terceira, Fernandez 1982, nas séries mais antigas do Nordeste (ilha de São Miguel), Maund 1985, na Serra das Fontes (ilha Graciosa), Rodrigues *et al.* 1996, no Complexo Vulcânico das Furnas (São Miguel) e França *et al.*, 1995b, na ilha do Pico. Schmincke e Weibel 1972 e Schmincke 1973 reportam a existência de traquitos comendíticos, nas ilhas Terceira e São Miguel, e de comenditos e panteleritos, na ilha Terceira. Maund 1985 refere a presença de traquitos comendíticos e comenditos na Graciosa e Rodrigues *et al.* 1996, constatam a existência de comenditos e riolitos no complexo vulcânico das Furnas, em São Miguel. A análise dos elementos maiores de rochas das diferentes ilhas permite a

constatação de que: (1) as lavas da ilha Terceira são mais peralcalinas, mais sobressaturadas e têm razões $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ mais elevadas do que as lavas com correspondentes índices de diferenciação (I.D.) de São Miguel (Schmincke 1973); (2) São Miguel é a ilha mais potássica (Schmincke e Weibel. 1972; Schmincke 1973); (3) a generalidade das lavas da Terceira tendem a ser mais saturadas em sílica do que as das outras ilhas (White *et al.* 1979) e (4) Santa Maria para além de apresentar basaltos altamente subsaturados exibe, igualmente, os basaltos mais sódicos do arquipélago (White *et al.* 1979). As diferenças geoquímicas inter-ilhas acentuam-se a nível dos elementos em traço.

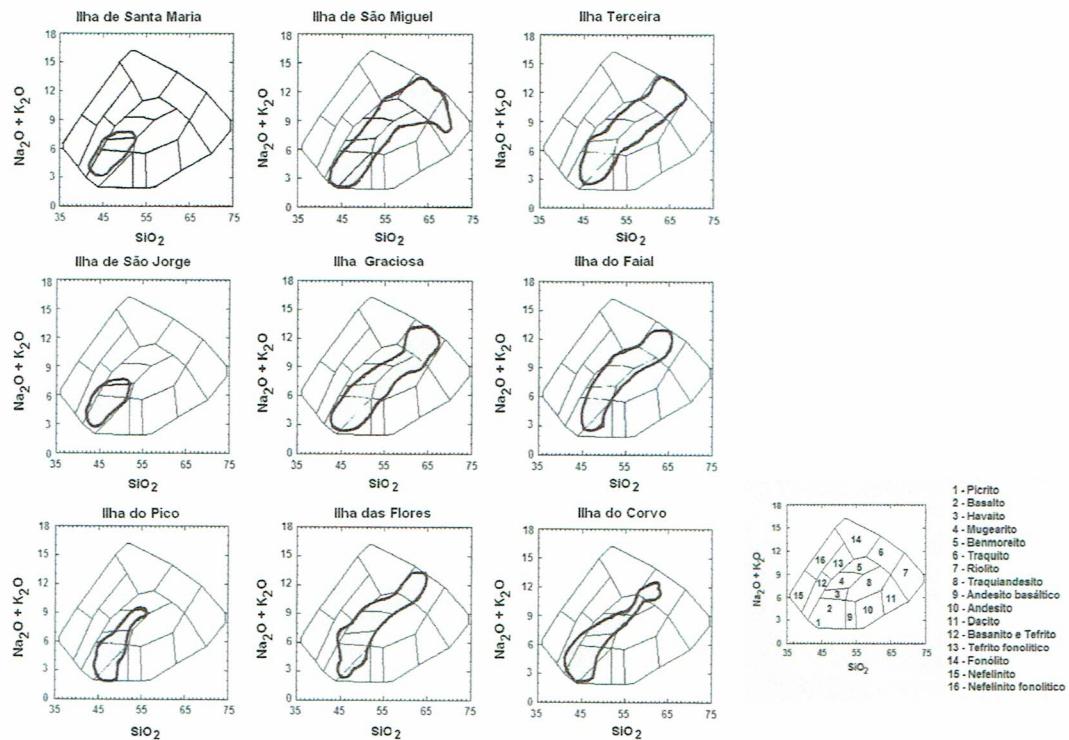


Fig. 1 – Diagrama Total Alcalis-Sílica (TAS), em % ponderais, com os campos estabelecidos por Cox *et al.* 1979 (segundo França, 2005).

Neste contexto, até aos anos 90, os diversos autores abaixo reportados concluíram que (1) as rochas de São Miguel mostram concentrações mais elevadas de Rb, Cs, Ti, Ba, Cr, Hf, Ta, Th, Sr e terras raras leves (LREE), do que idênticas rochas das outras ilhas (White *et al.* 1979), bem como é evidente uma variação regular nas razões isotópicas e nos elementos incompatíveis de E para W, que parece relacionada com a idade das formações vulcânicas (Feraud *et al.* 1980; Fetter 1981); (2) os basaltos de Santa Maria apresentam altos conteúdos de Ba, Sr, Hf, Ta, P e LREE (White *et al.* 1979) e valores anómalos de Y; (3) as Flores e o Corvo têm os modelos mais fraccionados de terras raras, altas concentrações de Rb, Cs, Ba, Ta, Th e valores elevados de Ta/Hf (White *et al.* 1979), razões isotópicas de Sr comparáveis às do MORB da zona da Plataforma dos Açores e razões de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ relativamente elevadas e compatíveis com a hipótese de uma fonte enriquecida em ^{232}Th radiogénico (Lemarchand 1987); (4) na ilha do Faial observam-se razões relativamente altas de Rb/Sr, La/Sm e Ta/Hf; (5) na Terceira as lavas denotam altos teores de Ba e terras raras pesadas (HRRE), e simultaneamente baixas concentrações de Sr, Hf, Ta e Th (White *et al.* 1979); (6) as ilhas Terceira, São Jorge e Graciosa têm características geoquímicas muito homogéneas e idênticas às da Zona FAMOUS, excepto no que se refere às razões Th/Hf que são nitidamente menores nesta zona (Lemarchand 1987) e (7) as ilhas do Pico e do Faial apresentam características geoquímicas intermédias entre o grupo constituído pela Terceira, São Jorge e Graciosa e o formado por Santa Maria e São Miguel (Lemarchand 1987).

A incidência de rochas da série alcalina nas diferentes ilhas contrasta com o carácter toléítico dos basaltos da Crista Média Atlântica (MORB). Não obstante, as diferenças são mais notórias quando se comparam os basaltos das ilhas oceânicas (OIB) com os basaltos “normais” da Crista Média Atlântica - MORB-N, do que com os basaltos da CMA que interactua com a Plataforma dos Açores - MORB-E (enriquecido). Relativamente aos OIBs e aos MORBs-E as diferenças mais significativas manifestam-se

por uma maior concentração de elementos de largo raio iónico (LILE) nos OIB. Entre as possíveis explicações para este facto, a que parece mais plausível é a de que os dois tipos litológicos terão resultado de uma mesma fonte mantélica, através de diferentes graus de fusão parcial que terá ocorrido a diversas profundidades. Na realidade, a análise do quadro I, permite inferir que o grau de fusão dos basaltos alcalinos deverá ser aproximadamente metade do dos toleítos, o que conduzirá a um enriquecimento duplo em LILE nos primeiros (White *et al.* 1976 e White *et al.* 1979).

Quadro I. – Comparação das concentrações médias dos LILE, em ppm, nos MORBs da Plataforma dos Açores e nos basaltos alcalinos das ilhas dos Açores.

	K	Rb	Cs	Sr	Ba	La	Sm	Y	Mg/(Mg+Fe ²⁺)
MORB (1)	4.680	9.84	0.126	230	170	16.6	4.4	2.2	0.68
OIB (2)	8.450	19.5	0.250	450	300	29	7.2	2.2	0.68

(1) White e Schilling 1978

(2) valores calculados (White *et al.* 1979)

A similaridade das razões Mg/(Mg+Fe²⁺) e das concentrações de Ni, Cr, Co e Sc das lavas menos evoluídas destes toleítos e dos basaltos alcalinos exclui a hipótese de que as diferenças observadas resultem de diferentes magnitudes de cristalização fraccionada, a partir de uma única fonte mantélica. Por outro lado, o facto das razões isotópicas de Sr em seis das ilhas dos Açores serem idênticas às dos toleítos da CMA adjacente, com valores que variam entre 0.70332 e 0.70354, apontam também no sentido de fontes mantélicas geoquimicamente semelhantes, embora, podendo apresentar ligeiras heterogeneidades. Relativamente às ilhas do Pico, Faial e sobretudo São Miguel, onde as razões isotópicas de Sr, nesta ilha, chegam a atingir o valor de 0.70525, White *et al.* 1976 e White *et al.* 1979 sugerem que poder-se-ão ter originado a partir de fontes mantélicas distintas das restantes. As diferenças, entre os toleítos dos segmentos normais da Crista Média Oceânica e os da zona que interactua com a Plataforma dos Açores, expressam-se, especialmente, por um maior enriquecimento em LILE, isótopos de Sr e de Pb (Hart *et al.* 1973, Tatsumoto 1966 in Schilling 1975a), bem como de Fe e de Ti (Schilling 1975a e Schilling 1975b) dos MORB-E relativamente aos MORB-N. Estas ocorrências levaram à idealização de um modelo que considera que os MORB-N são provenientes da astenosfera empobrecida, enquanto que os da Plataforma dos Açores resultam da mistura do magma de uma pluma subjacente às ilhas do arquipélago com o magma parental dos MORB-N (Shilling 1975a, Shilling 1975b, White *et al.* 1976, White e Schilling 1978 e White *et al.* 1979). Ainda, é advogado por White *et al.*, 1979 e Widom *et al.*, 1992, que tanto os basaltos alcalinos como os toleitos da Plataforma devem ser originados a partir de uma mesma pluma mantélica, embora os primeiros, pelas suas características específicas, exijam um enriquecimento adicional de componentes com afinidades de manto enriquecido (enriched mantle - EMI ou EMII). White e Schilling 1978, White *et al.* 1976 e White *et al.* 1979 consideraram que a taxa de injecção do material da pluma é suficientemente elevada, pelo que, ultrapassando o volume requerido para colmatar o espaço resultante da expansão das placas litosféricas sobrejacentes, vai contribuir para o espessamento da plataforma e consequentemente para o aparecimento, nesta região, de uma anomalia gravimétrica positiva. Pelo estudo desenvolvido sobre lavas históricas e pré-históricas das ilhas do Pico, Faial, São Jorge, Terceira e São Miguel, Flower *et al.* 1976, concluem não haver evidências geotérmicas que sustentem a existência de uma pluma térmica na região dos Açores. Consideraram que as variações detectadas em determinados parâmetros, tais como, La/Sm, K/Na e La/P seriam uma consequência do controle exercido durante a fusão parcial por determinadas fases mineralógicas existentes na paragénese da fonte. Os mesmos cientistas referem que as variações que ocorrem nos magmas primitivos dos Açores se relacionam fundamentalmente (1) com heterogeneidades do manto, resultantes do papel desempenhado por fases secundárias ricas em LILE, que em condições de estabilidade de pressão e temperatura facilitam a remoção de líquidos primitivos empobrecidos em LILE e de composição idêntica à dos toleítos e (2) com diferentes graus de fusão parcial. Defendem, ainda, que a instabilidade geofísica da região, criada pela interacção de um sistema complexo de estruturas, conduz a processos de extrema fraccionação do manto que, associados a baixas taxas de fusão parcial, levariam a valores excepcionalmente elevados das razões de La/Sm, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr e K/Na, especialmente nos magmas de São Miguel.

A recorrência a um maior número de estudos isotópicos nos últimos anos tem permitido criar uma série de cenários geoquímicos para a região dos Açores, o que é manifestamente demonstrativo da complexidade regional em que o arquipélago se insere. A maior parte dos trabalhos de investigação desenvolvidos, para além de tentarem caracterizar a fonte magmática através da variabilidade das razões

isotópicas dos OIBs, objectivam dar consistência à hipótese da existência de uma pluma mantélica que consubstancie o vulcanismo anómalo que ocorre nesta zona atlântica e que foi responsável pela edificação das várias ilhas açorianas actuais e do passado. Neste âmbito, e focalizando-nos no caso particular da ilha de São Miguel (Hawkesworth *et al.* 1979, White *et al.* 1979, Davies *et al.* 1989, Widom *et al.* 1997, Haase e Beier 2003, Elliot *et al.* 2007) constataram a existência, ao longo da ilha de São Miguel, de importantes heterogeneidades existentes no que concerne às assinaturas isotópicas de Sr, Nd, Pb, He e Hf. Widom *et al.* 1997 reconheceram a existência de uma correlação (1) positiva entre a distância à zona ocidental da ilha de São Miguel e as razões de Sr e Pb e (2) negativa entre $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$, resultante do incremento do K para leste (Fig.2a, 2b e 2c). Na sequência destas variações conjectura-se que o magmatismo associado à ilha de São Miguel resulta de uma mistura de duas fontes mantélicas: uma empobrecida, responsável pelo vulcanismo da parte ocidental e idêntica à dos toleitos da Plataforma dos Açores (MORB-E) e outra enriquecida, associada à edificação da parte oriental, do tipo EMII.

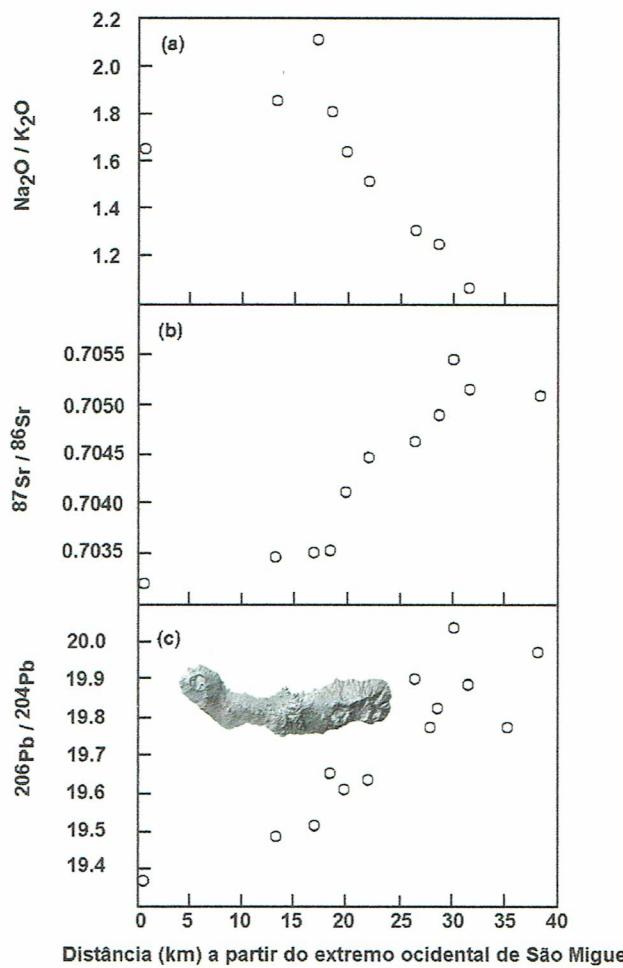


Fig. 2 –Variação de (a) $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$; (b) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e (c) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ em função da distância à parte ocidental da ilha de São Miguel (modificado de Widom *et al.* 1997)

A explicação para a ocorrência deste manto enriquecido, segundo aqueles autores, não é explicável através da incorporação de sedimentos terrígenos subductados, que embora podendo consubstanciar diversos aspectos não aclaram, por exemplo, o comportamento de algumas razões inter-elementares, nem a recente diminuição de Th/U do manto enriquecido que éposta em evidência através da sistemática dos isótopos de Th e Pb. Entre os vários argumentos considerados insere-se a variabilidade da razão Cs/Rb por ser considerada como um dos mais importantes factores indicadores do contributo de sedimentos no manto. No caso particular de São Miguel, esta razão determinada em basaltos de toda a ilha é relativamente baixa e constante, com valores compatíveis com os encontrados em MORBs e em muitos OIBs, distanciando-se, portanto, das razões mais elevadas e variáveis dos sedimentos, da crusta continental superior e dos basaltos das ilhas em arco. Ao invés, verifica-se que há uma apreciável similitude entre os elementos em traço e as assinaturas isotópicas do manto enriquecido de São Miguel

com o manto litosférico subcontinental. Na realidade, visionando a figura 3, verifica-se que, comparando os modelos de alguns elementos em traço do manto enriquecido de São Miguel com o valor médio dos xenólitos peridotíticos hidratados com flogopite potássica e richetrite (PKP), em ambos os casos, a par de um enriquecimento em Rb, K e Zr existe um empobrecimento em Ba e Nb. Mais interessante é verificar, na mesma figura, que por adição de 4% de um componente do tipo PKP (valor médio) ao manto empobrecedo de São Miguel se produz uma fonte mantélica com características muito semelhantes às do manto enriquecido desta ilha.

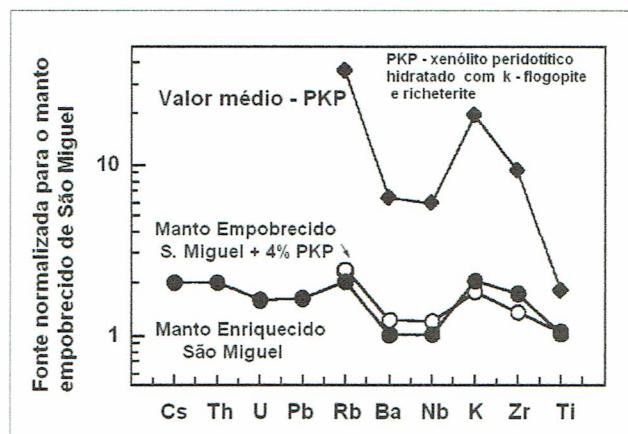


Fig. 3 – Variação inter-elementar da fonte mantélica enriquecida de São Miguel e do valor médio de xenólito peridotítico hidratado com flogopite potássica e richetrite –PKP (modificado de Widom *et al.* 1997).

Articulando todos os dados Widom *et al.* 1997 formularam a hipótese de que o enriquecimento do manto, responsável pela formação da parte oriental de São Miguel, terá decorrido na sequência da abertura do Atlântico o que possibilitou que uma “lâmina” do manto subcontinental litosférico, da África Ocidental ou da Península Ibérica, se tivesse alojado na base da litosfera oceânica subjacente à zona leste desta ilha. A fusão desta “lâmina” contaminante subcontinental litosférica decorreria do fluxo de calor proveniente da própria pluma dos Açores. Moreira *et al.* 1999, através de estudos centrados nas assinaturas de hélio e, de certa forma concordantes com a geoquímica do chumbo, identificaram 3 grupos de ilhas açorianas, que Turner *et al.* 1997 já tinham proposto baseando-se, por sua vez, na sistemática dos elementos traço e nos isótopos de U-Th: (1) São Miguel, com altas razões de $^{4}\text{He}/^{3}\text{He}$; (2) Faial, Graciosa e Santa Maria com razões idênticas aos MORBs e (3) Pico e Terceira com valores mais dispareys, mais dispersos, variando dos típicos MORBs aos relativamente mais primitivos (Fig. 4). A conjugação dos vários dados permitiram que Moreira *et al.* 1999 alvitrassem dois modelos que tentam explicar a génesis do arquipélago. Numa primeira hipótese é considerada uma fonte profunda isotopicamente heterogénea, contendo uma mistura de sedimentos terrígenos subductados, crista oceânica alterada e material do manto inferior. Na sequência de baixas taxas de fusão a assinatura da parte fértil da mistura, directamente relacionada com os sedimentos, manifesta-se preferencialmente na zona do Nordeste de São Miguel, enquanto nas restantes ilhas as características exibidas resultam de uma maior taxa de fusão e de uma mistura em que prevalecem a crista oceânica reciclada e os materiais dos mantos inferior e superior. A heterogeneidade desta fonte pode reflectir as características da própria fonte ou resultar da contaminação da pluma, oriunda de uma maior profundidade, por materiais aprisionados a menores profundidades. A segunda hipótese propõe a existência de uma pluma profunda isotopicamente homogénea, com uma assinatura do tipo “Terceira” (material do manto inferior e do tipo HIMU- componente mantélico com razões isotópicas de Pb extremamente elevadas). Neste contexto, as especificidades da ilha de São Miguel resultariam da fusão, por influência do calor da pluma em ascensão, de heterogeneidades muito localizadas, nomeadamente crista oceânica subductada e sedimentos guardados debaixo do continente Norte Americano durante a subducção e que terão sido reciclados no manto superior durante a abertura do Atlântico Norte e posteriormente englobadas na pluma em ascensão (Fig. 5).

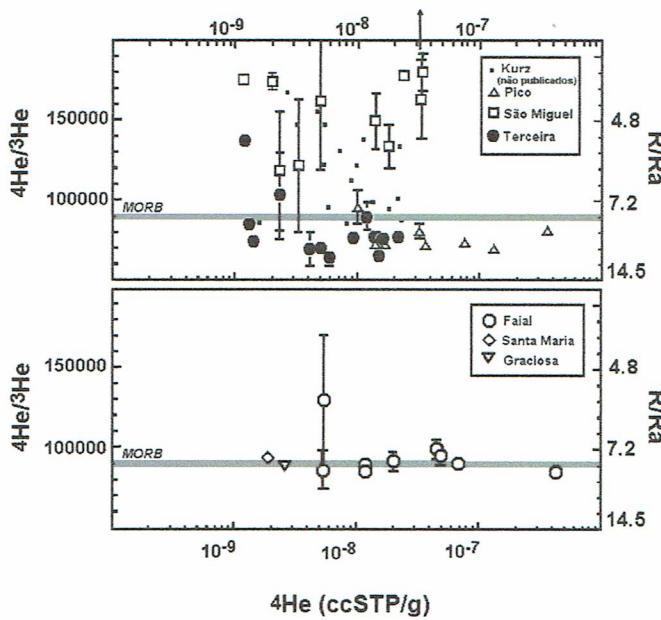


Fig. 4 – Diagramas de razões de ${}^4\text{He}/{}^3\text{He}$ versus concentrações de ${}^4\text{He}$ para amostras de algumas ilhas do arquipélago dos Açores (modificado de Moreira *et al.* 1999).

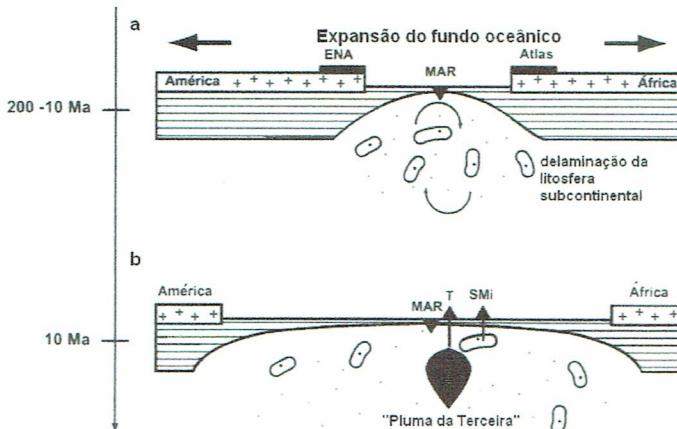


Fig. 5 Evolução esquemática da abertura do Atlântico (a) acompanhada de delaminação da litosfera subcontinental e (b) enriquecimento do manto de São Miguel por reciclagem do material antigo e localização da “Pluma da Terceira” (modificado de Moreira *et al.* 1999).

Este modelo em termos gerais é semelhante ao de Widom *et al.* 1997 e parece igualmente suportado através das assinaturas isotópicas de Os de São Miguel. De facto, a invariabilidade das razões isotópicas deste elemento ao longo da ilha, com valores idênticos ao da pluma dos Açores, é comprovativa da influência insignificante que a incorporação de 4% do manto litosférico subcontinental, empobrecido em Re, na sequência da evolução geológica da Terra, provoca naquela pluma; pelo contrário, como anteriormente visto, a mesma proporção de uma fracção de manto litosférico subcontinental do tipo PKP tem efeitos expressivos em outros isótopos e em elementos traço incompatíveis (ver figura 3). Mediante estudos tendo por base razões isotópicas de ${}^{20}\text{Ne}/{}^{22}\text{Ne}$, determinadas em amostras da ilha Terceira, Madureira *et al.* 2005, detectaram que as rochas daquela ilha patenteavam valores mais primitivos dos que os MORBs. Tal constatação permitiu concluir que aquelas rochas teriam a assinatura do reservatório mantélico que alimenta o *hotspot* dos Açores, relativamente não desgasificado, e com características mais primitivas. Concluíram, ainda, que a sistemática do Ne se mostrava mais eficiente do que a do hélio na identificação de *hotspots* que interacituam com as cristas oceânicas e, que são assim, dominados pelos valores típicos dos MORB. Elliot *et al.* 2007 refutam os modelos anteriores, contrapondo que as razões

elevadas de Th/Nb e La/Nb, exibidas pelo manto enriquecido de São Miguel, e apontadas por outros, podem ser justificadas baseando-se, principalmente, na sistemática isotópica do par Sm-Nd e Lu-Hf, não necessitando do contributo de sedimentos terrígenos ou de litosfera continental o que é, de certa forma, corroborado por Haase e Beier 2007. É sugerido, então, que para a formação de um componente enriquecido do tipo São Miguel oriental bastaria que uma fonte granatífera tivesse sofrido um grau de fusão moderado, de aproximadamente 2%, ficando o líquido isolado durante um longo período, provavelmente superior a 2 Ga antes de ser misturado em pequenas proporções (<5%) com o manto mais comum. Tendo em conta que não existem indícios de alteração sub-superficial ou de modificações associadas a processos de subducção parece presumível, segundo estes autores, que o componente enriquecido de São Miguel estivesse subjacente à placa litosférica, não integrando o edifício vulcânico. Assim sendo, durante o seu alojamento por debaixo daquele edifício terá havido desgasificação, provocando um incremento na razão U/He, tal como o que se pode inferir pelas altas razões de $^{40}\text{He}/^{3\text{He}}$ que as amostras enriquecidas de São Miguel exibem, de acordo com os valores apresentados por Moreira *et al.* 1999. Bourbon *et al.* 2005, adoptando o modelo proposto por Moreira *et al.* 1999, no que concerne ao posicionamento do centro da pluma dos Açores na proximidade da Terceira, verificaram que as ilhas próximas daquele centro são caracterizadas por maiores razões de actividade de ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$) e menores de ($^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$) do que as que se encontram mais afastadas. Alvitram estes autores que, embora as correlações de ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$) e ($^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$) com os isótopos de Sr, Nd e Pb possam ser explicadas pela presença de um componente específico da ilha de São Miguel, as variações entre ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$) e ($^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$) impõem que o centro da pluma se caracterize por uma pressão de fusão inicial mais profunda, associada a mais rápidas taxas de fusão comparativamente com a periferia da pluma. No entanto é pressuposto que a taxa de fusão nos Açores é mais lenta do que no Hawaii e na Islândia implicando uma mais lenta velocidade de ascensão no centro da pluma dos Açores. Por outro lado é alegado que a presença de água na fonte é responsável pelo comportamento atípico do ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$), em função da distância ao centro da pluma, uma vez que a água induz uma fusão a maior profundidade, com baixas taxas de fusão, o que provocaria um aumento na razão ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$). O modelo numérico tridimensional construído por Bourbon *et al.* 2005, embora com todas as condicionantes apontadas, põe em evidência uma zona de maior temperatura, de maior velocidade de ascensão e de mais baixa taxa de actividade Pa/U, identificável com o ponto quente dos Açores (Fig.6). Ainda que salientando as restrições que o modelo pode apresentar é adiantado que a velocidade de ascensão deve rondar os 3 a 4 cm/ano no centro da pluma ao contrário da periferia com valores da ordem de 1 cm/ano. Estes valores, nitidamente inferiores aos do Hawaii e Islândia, são suficientes para explicarem as razões isotópicas de Pa-U e Th-U observadas no centro dos Açores.

Outros trabalhos, incidindo na análise da sistemática do ósmio, tentam igualmente caracterizar a pluma, bem como inferir sob a profundidade a que a mesma é gerada. Assim, Widom e Shirey 1996 constataram que (1) as razões isotópicas de Os que são patenteadas nas rochas de São Miguel, Terceira, Graciosa, São Jorge, Faial e Pico exibem um leque de valores aproximadamente idêntico ao da maior parte dos basaltos das ilhas oceânicas de todo o mundo; (2) entre as ilhas não se observam diferenças sistemáticas, ao invés do que pode ocorrer dentro de cada ilha, tal como, no caso particular da Terceira onde as razões de $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ estão compreendidas entre 0.128 e 0.195, valores estes praticamente idênticos aos verificados para a quase globalidade do arquipélago (0.122 – 0.195); (3) São Miguel apresenta altas concentrações de Os e uma variação isotópica de Os bastante limitada, ao contrário do que acontece ao longo desta ilha relativamente a outros isótopos, como Sr, Nd, Pb, Th e He, como sobejamente referido, e (5) os valores médios dos isótopos de Os da pluma dos Açores e de muitas outras plumas são muito mais elevados do que os supostos valores do manto superior ou de qualquer grupo de condritos.

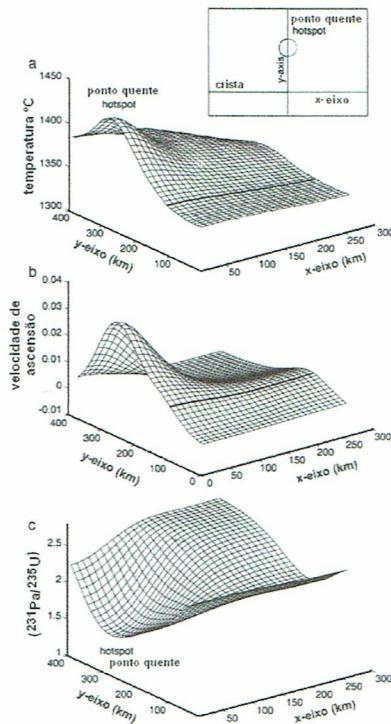


Fig. 6 – Modelo numérico tridimensional relacionando ($^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$), velocidade de ascensão da pluma e variação da temperatura com a distância ao centro da pluma. A velocidade de ascensão é expressa em m/ano. O eixo dos X é paralelo à CMA (modificado de Bourbon *et al.* 2005).

Para estes investigadores a pluma seria responsável pelo comportamento isotópico do Os, enquanto que, para os restantes isótopos, o manto litosférico subcontinental desempenharia um papel predominante. Tendo em conta, as elevadas razões isotópicas, acima assinaladas, que se observam nas ilhas oceânicas, é de supor que a pluma tenha origem a nível do camada “D ou da parte mais interna do manto, podendo ser o núcleo externo a fonte de Os que, directa ou indirectamente, a enriquece. Esta hipótese é consonante com a existência de plumas ascendendo da interface núcleo-manto inferior. Anderson *et al.* 2000 e Meibom *et al.* 2003 contrapõem que as variações isotópicas de He e Os existentes entre os MORBs e os OIBs se podem explicar através de misturas de diferentes proporções de domínios radiogénicos e não radiogénicos de diferentes idades do manto superior heterogéneo, reciclado, que terá sofrido variáveis graus de fusão parcial. A formação dos *hotspots* seria explicada por ascensão astenosférica como resposta à fracturação relacionada com o complexo sistema tectónico actuante na região Açores.

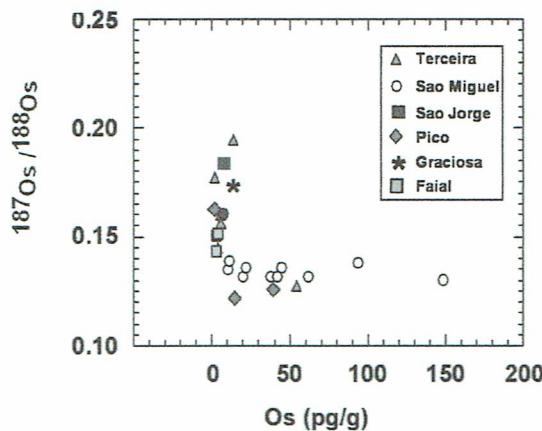


Fig. 7 – Diagrama de variação $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ versus concentrações de Os para amostras de algumas ilhas do arquipélago dos Açores (*in* Widom e Shirey 1996).

Por outro lado, a existência de uma pluma parece, segundo Yang *et al.* 2006, ser detectada através da interpretação de um modelo de tomografia sísmica que evidencia anómalas baixas velocidades das ondas P sob o *hotspot*, que segundo estes autores está localizado a NE da Terceira. A anomalia observada desenvolve-se ao longo das ilhas e por debaixo do centro da Plataforma dos Açores, ligando-se a uma outra de forma colunar situada a NE da Terceira que se prolonga desde aproximadamente os 250km de profundidade até pelo menos ao topo da Zona de Transição do Manto (Fig. 8). Tal facto levou aqueles investigadores a inferirem (1) que a coluna de baixa velocidade das ondas P corresponde ao local da Pluma dos Açores e (2) que esta é desviada para SW, quando ascende através da parte mais externa do manto, o que parece suportado pelos dados geográficos, geoquímicos e, até, pela própria evolução da junção tripla dos Açores.

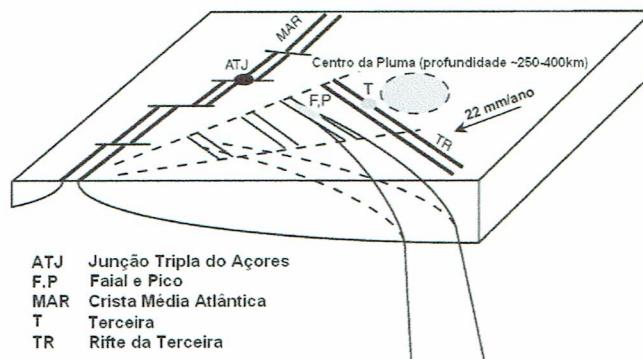


Fig. 8 – Modelo esquemático mostrando a interacção *hotspot*-crista na região dos Açores. MAR-Crista Média Atlântica; ATJ – Junção Tripla dos Açores; TR – Rife da Terceira; F – Faial; P – Pico; T – Terceira. Linhas paralelas ao rife representam possíveis anteriores posicionamentos dos riftes associados com a migração da ATJ. A seta indica a direcção do movimento total das placas Africana e Euroasiática próximo dos Açores relativamente ao *hotspot* (modificado de Yang *et al.* 2006).

Numa visão mais abrangente, e de cariz preventivo, todos os estudos desenvolvidos devem contribuir, em última instância, para um melhor conhecimento do vulcanismo do arquipélago. Esta preocupação está implícita, por exemplo, no trabalho de Snyder *et al.* 2007 que, através de medidas de alta precisão de ^{226}Ra - ^{230}Th - ^{238}U e de concentrações de Ba, conseguiram determinar os tempos de permanência dos magmas relacionados com as erupções do Fogo A e de 1563 A.D., ambas do vulcão do Fogo (São Miguel). A relação entre a duração de fraccionamento e o volume de material vulcânico emitido nas duas erupções variou de forma proporcional. Na realidade, o volume de 0.7 km³ DRE (equivalente a rocha densa) de lapilli traquítico foi emitido depois de 4700 anos de fraccionamento magnético enquanto que os 0,14 km³ DRE, relativos à erupção de 1563, resultaram de um diferenciação magnética apenas da ordem dos 50 a 80 anos. Conhecimentos desta natureza são fundamentais na avaliação da perigosidade vulcânica associada a importantes vulcões compósitos com câmaras magnáticas e com períodos de vulcanismo de alta explosividade do tipo pliniano a subpliniano recorrentes em algumas ilhas do arquipélago. Neste âmbito, os autores deste artigo encontram-se envolvidos em vários projectos, com equipas de outras Universidades Nacionais e Estrangeiras, com o objectivo de caracterizarem geoquímica e geofisicamente o arquipélago, de forma global e integrada, tendo sempre como meta a atingir o melhor entender a dinâmica da região, os sistemas e processos magnéticos, o vulcanismo e a recorrência vulcânica visionando a salvaguarda das populações que constituem a património humano dos Açores.

REFERÉNCIAS

- Almeida, M.H. (2001) A fonte mantélica na região dos Açores: constrangimentos impostos pelas características geoquímicas de rochas vulcânicas e de xenólitos ultramáficos. Tese de Doutoramento em Vulcanologia. Departamento de Geociências, Universidade dos Açores. 274 p.
- Almeida, M.H., Rodrigues, B. (1993) Petrografia dos xenólitos peridotíticos do Complexo Vulcânico das Sete Cidades (Ilha de São Miguel, Açores). *Açoreana*, 7(4): 583-601.
- Anderson, D.L. (2000) The statistics and distribution of helium in the mantle. *Int. Geol. Rev.* 42: 289-311.
- Assunção, C.F.T. (1961) Estudo petrográfico da ilha de S. Miguel (Açores). *Com. Serv. Geol. Portugal*, tomo XLV: 81-176.
- Assunção, C.F.T., Canilho, M.H. (1969-70) Notas sobre petrografia comparada das ilhas Atlânticas (Arquipélagos dos Açores e de Cabo Verde). *Bol. Mus. Lab. Min. Geol. Fac. Ciências Lisboa*, 11(2): 305-342.
- Baker, M.J. (1966) Blocks of Plutonic Aspect in a Basaltic Lava from Faial, Azores. *Geological Magazine* 103 (1): 51-60.

- Bedemar, V. (1837) Resumo de observações geológicas (Madeira, Porto Santo e Açores nos anos de 1835 e 1836 in Arquivo dos Açores. Vol. X:289-296.
- Beier, C. (2006) The magmatic evolution of Oceanic Plateaus: a case study from the Azores. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch- Naturwissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts- Universität zu Kiel; 128p.
- Benhamou, G., Lemarchand, F (1984) Petrologie des îles de Flores et Corvo (Açores, Portugal). Relatório 29 p.
- Berthois, L. (1953) Contribution à l'étude lithologique de l'archipel des Açores. Com. Serv. Geol. Port., 34, 198p.
- Bourdon, B., Langmuir, C.H., Zindler, A. (1996) Ridgehotspot interaction along the Mid-Atlantic Ridge between 37°30' and 40°30'N: the U-Th disequilibrium evidence, Earth and Planetary Science Letters, 142 (1-2): 175-189.
- Bourdon, B., Turner, S. P., Ribe, N. M. (2005) Partial melting and upwelling rates beneath the from a U – series isotope perspective. Earth and Planetary Science Letters 239: 42 - 56.
- Cann, J.R. (1967) A second occurrence of dalyite and petrology of some ejected syenite blocks from S. Miguel, Azores. Mineralogical Magazine, 36, 278: 227-232.
- Castro, E.V.P.C. (1888) Recherches micrographiques sur quelques roches de l'Ile de San Miguel, (Açores). Imprimerie Nationale, 7-91.
- Chovelon, P. (1982) Évolution volcanotectonique des îles de Faial et de Pico. Archipel des Açores- Atlantique nord. Thèse présentée à l'Université de Paris-Sud Centre d'Orsay.193p.
- Claude-Ivanaj, C., Jordon, J.-L., Allègre, C.J. (2001) ^{238}U - ^{230}Th - ^{226}Ra fractionation in historical lavas from the Azores: long-lived source heterogeneity vs. metasomatism fingerprints, Chemical Geology, 176 (1-4): 295-310.
- Cooper, K.M., Eiller, J.M., Asimow, P.D., Langmuir, C.H. (2004) Oxygen isotope evidence for the origin of enriched mantle beneath the mid-Atlantic ridge, Earth and Planetary Science Letters, 220 (3-4): 297-316.
- Cox, K.G., Bell, J.D., Pankhurst, R.J. (1979) The interpretation of igneous rocks. George Allen and Unwin, London. 450p.
- Darwin, C. (1876) Geological Observations on Volcanic Islands and parts of South America visited during the voyage of H.M.S. 'Beagle'. 2d edition. London: Smith Elder and Co.
- Davies, G.R., Norry, M.J., Gerlach, D.C., Cliff, A., (1989) A combined chemical and Pb-Sr-Nd isotope study of the Azores and Cape Verde hot-spots: the geodynamic implications. In: Saunders, A.D. & Norry, M.J. (eds), Magmatism in the Ocean Basins, Geological Society Special Publication 42: 231-255
- Demande, R. Fabriola, A. Gerard, F. Iundt, Chovelon, P. (1982) Prospection géothermique, îles de Faial et de Pico (Açores). Rapport géologique, géochimique et gravimétrique - Rapport d'avancement. Rapport BRGM 82 SGN 003 GTH. 20p.
- Dosso, L., Bougault, H., Langmuir, C., Bollinger, C., Bonnier, O. Etoubleau, J., (1999) The age and distribution of mantle heterogeneity along the Mid-Atlantic Ridge (31–41°N), Earth and Planetary Science Letters, 170 (3): 269-286.
- Elliott, T., Blichert-Toft, J., Heumann, A., Koetsier, G., Forjaz, V. (2007) The origin of enriched mantle beneath São Miguel, Azores. Geochimica et Cosmochimica Acta 71: 219–240
- Esenwein, P. (1929) Zur Petrographie der Azoren. Z. Vulk., 3, 12: 128-227.
- Evene, N.M., Hamilton, P.J., O'Nions, R.K. (1978) Rare earth abundances in chondritic meteorites. Geochim. Cosmochim. Acta, 42: 1199-1212.
- Féraud, G., Kaneoka, I. e Allègre, J.C. (1980) K/Ar ages and stress pattern in the Azores: geodynamic implications. Earth Planet. Sci. Lett. 46: 275-286.
- Féraud, G., Schmincke, H.-U., Lietz, J., Gostaud, J., Pritchard, G., Bleil, U. (1984) New K-Ar ages, chemical analysis and magnetic data of rocks from the islands of Santa Maria (Azores), Porto Santo and Madeira (Madeira Archipelago) and Gran Canaria (Canary islands). Arquipélago, 5: 213-240.
- Fernandes, N.M. (1977) Geochimie de l'île de São Jorge (Açores). Mémoire présenté à la faculté des Etudes Supérieures en vue de l'obtention de la Maîtrise es sciences (Géologie). Université de Montréal, Faculté des Arts et des Sciences, Département de Géologie. iii-17.
- Fernandez, L.A. (1980) Geology and petrology of the Nordeste volcanic complex, São Miguel, Azores: Summary. Geological Society of America Buletin 91 (12): 675-680.
- Fernandez, L.A. (1982) The petrology and geochemistry of the Nordeste Volcanic Complex, São Miguel, Azores. Arquipélago : 3, 145-158.
- Fetter, P. (1981) Ile de São Miguel (Açores) Structurologie et Petrologie. Thèse pour obtenir le titre de Docteur 3ème cycle en Pétrographie – Volcanologie. Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay. 140p
- Fidczuk, P. (1984) Chemistry of peralkaline felsic rocks from São Miguel and Terceira, Azores. Thesis for the degree of doctor of Philosophy in the University of Reading. 314p..
- Flower, M.F.J., Schmincke, H.-U., Bowman, H. (1976) Rare earth and other trace elements in historic azorean lavas. J. Volcanol. Geotherm. Res., 1(2): 127-147.
- Forjaz, V.H. (1963) Lista de rochas dos Açores. Boletim do Núcleo Cultural da Horta (Açores) 3 (2): 153-164.
- Fouqué, F. (1873), Voyages géologiques aux Açores, I. L'île de Terceira. Revue des Deux-Mondes, 1er Jan., XLIII année, seconde période, t. CIII: 40-65.
- França, Z. (1993) Contribuição para o estudo dos xenólitos sieníticos do Arquipélago dos Açores. Tese. Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores. Ponta Delgada. 216p..
- França, Z. (2000) Origem e evolução petrológica e geoquímica do vulcanismo da ilha do Pico, Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Geologia, 372 pp., Univ. dos Açores, Ponta Delgada.
- França, Z. (2005) Petrologia do arquipélago dos Açores. In: FORJAZ, V.H. Atlas Básico dos Açores. Observatório Vulcanológico e Geotérmico dos Açores (Ed). Ponta Delgada

- França, Z., Rodrigues, B. (1993/94) Nota sobre a distribuição espacial de xenólitos sieníticos no arquipélago dos Açores. Geociências, Rev. Univ. Aveiro, 8 (1-2).
- França, Z., Rodrigues, B. (1995) Distribuição e modo de jazida de xenólitos sieníticos no arquipélago dos Açores. Poster in "V Congresso Nacional de Geologia". Porto. Dezembro. 1995.
- França, Z., Almeida, M.H., Wallenstein, N. (1995a) – Sobre a ocorrência de xenólitos mantélicos numa lava da ilha do Pico. Gaia, 11: 47-52.
- França, Z., Rodrigues, B., Cruz, J.V., Carvalho, M.R., Nunes, J.C. (1995b) Ensaio de orientação para o estudo petrológico e geoquímico das lavas históricas da ilha do Pico – Açores. IV Congresso Nacional de Geologia, Porto, Mem. Mus. Lab. Min. Geol. Fac. Ciências Porto, 4: 723-724.
- França, Z., Rodrigues, B., Araña, V., Tassinari, C., Aparício, A., Cruz, J.V., Nunes, J.C., Forjaz, V.H. (2001) Estudo geoquímico comparativo entre as lavas históricas das ilhas do Grupo Central do Arquipélago dos Açores. Resumos – III Congresso Ibérico da Geoquímica, Zaragoza, Espanha. 20-25.
- França, Z., Cruz, J.V., Nunes, J.C., Forjaz, V.H. (2003) Azores historical eruptions: geochemical features and related eruptive styles. Abstracts, Week A – "XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics". Junho/Julho. Sapporo, Japão; p. A.558.
- França, Z., Laranjeira, P. (2004) Database of Azores Rock Geochemistry: First Approach. 3^{as} Jornadas Internacionais de Vulcanologia da Ilha do Pico – Livro de Resumos Alargados". Outubro. São Roque do Pico. p. 32-34.
- França, Z., Lago, M., Nunes, J.C., Galé, C., Forjaz, V.H., Gil, A., Arranz, E. (2005a) Mineral composition and geothermometry in alkali basalts of the Corvo Island (Azores, Portugal). Vº Congreso Ibérico de Geoquímica y IXº Congreso de Geoquímica de España. Soria, 20-23 de septiembre de 2005. Editado por el Servicio de Informática de la Diputación Provincial de Soria. Biblioteca Electrónica de la Excma. Diputación Provincial de Soria. Núm.6. Comunicación publicada en CD y Libro de Resúmenes, pp: 52-63 (ISBN: 84-95099-88-8).
- França, Z., Lago, M., Nunes, J.C., Galé, C., Forjaz, V.H., Gil, A., Arranz, E. (2005b) Geochemistry of alkaline basalts of the Corvo Island (Azores, Portugal): Preliminary data. Vº Congreso Ibérico de Geoquímica y IXº Congreso de Geoquímica de España. Editado por el Servicio de Informática de la Diputación Provincial de Soria. Biblioteca Electrónica de la Excma. Diputación Provincial de Soria. Núm.6. Comunicación publicada en CD y Libro de Resúmenes. pp: 42-51 (ISBN: 84-95099-88-8).
- França, Z., Lago, M., Galé, C., Nunes, J.C., Pueyo, O., Gil, A., Arranz, E., Forjaz, V.H., Pocovi, A., (2006a) Geochemistry of Corvo Island Basalts (Azores, Portugal): Considerations about Magma Sources and Genetic Processes. "4^{as} Jornadas Internacionais de Vulcanologia da Ilha do Pico – Livro de Resumos Alargados". Maio. Lajes do Pico, p. 31-33.
- França, Z., Lago, M., Galé, C., Nunes, J.C., Pueyo, O., Gil, A., Arranz, E., Forjaz, V.H., Pocovi, A. (2006b) Mafic Enclaves from the Corvo Island Basalts (Azores, Portugal): Preliminary Data. "4^{as} Jornadas Internacionais de Vulcanologia da Ilha do Pico – Livro de Resumos Alargados". Maio. Lajes do Pico, p.34-36.
- França, Z., Araña, V., Aparicio, A., Forjaz, V. (2006c) Two Atlantic potentially dangerous stratovolcanoes in different stage of evolution: Teide-Pico Viejo (Canary Islands) and Montanha do Pico (Azores islands). Fourth Conference Cities on Volcanoes. IAVCEI. Quito-Ecuador. Abstracts Volume. P. 56. Jan.2006
- França, Z., Tassinari, C., Cruz, J., Aparicio, A., Araña, V., Rodrigues, B. (2006d) Petrology, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes of the volcanic rocks from Pico – Azores (Portugal). Journal of Volcanology and Geothermal Research, Special Issue ("Volcanic Geology of Azores Islands") 156 (1-2): 71-89.
- França, Z., Lago, M., Galé, C., Ubide, T., Widom, E., Arranz, E., Forjaz, V.H. (2008) Composition of gabbroic xenoliths in Flores Island (Azores, Portugal). Macla, 9. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía. España.
- Frutooso, G. (1978) Saudades da Terra. Ed. Instituto Cultural de Ponta Delgada, 6: 432p..
- Girod, M., Lefèvre, C. (1972) A propós des andésites des Açores. Contrib. Mineral. Petrol.. 15: 159-166.
- Haase, K. M., Beier, C. (2003) Tectonic control of ocean island basalt sources on São Miguel, Azores. Geophysical Research Letters, 30 (16), 1856, doi:10.1029/2003GL017500.
- Hart, S., Schilling, J.-G., Powell, J.L. (1973) Basalts from Iceland and along Reykjanes Ridge: Sr isotope geochemistry. Nature, 246: 104-107.
- Hartung, G. (1860) Die Azoren in ihrer auBeren Erscheinung und nach ihrer geognostischen. Natur. I-VIII. Engelmann Verlag, Leipzig, 350p..
- Hawkesworth, C., Norry, M., Roddick, J., Vollmer, R. (1979) $^{143}\text{Nd}/\text{Nd}^{144}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios from the Azores and their significance in LIL-element enriched mantle. Nature, 280: 28-31.
- Kurz, M.D., Moore, R.B., Kammer, D.P., Gulessarian, A. (1997) An isotopic study of radioncarbon-dated alkali basalts from São Miguel, Azores; implications for the origin of the Azores hot spot. Earth & Planetary Science Letters, submitted
- Lacroix, A. (1893) Les enclaves des roches volcaniques. Mácon, Protat, Impr.
- Lago, M., França, Z., Galé, C., Widom, E., Arranz, E., Forjaz, V.H., Pueyo, O., e Ubide, T. (2007) Gabbroic enclaves of the Corvo Island (Azores, Portugal). VI Congresso Ibérico de Geoquímica. XV Semana de Geoquímica. Vila Real. Portugal.
- Lemarchand, F. (1984) Les séries volcaniques de Faial, Açores: comportement des éléments chimiques dans leur évolution. Thèse de 3^{ème} cycle, Univ. Pierre et Marie Curie, 241p.
- Lemarchand, F. (1987) Les séries volcaniques de Faial (Açores): Étude petrologique et géochimique. Can. J. Earth Sci. 24: 334- 353.
- Machado, A., Azevedo, J.M.M., Almeida, D.P.M., Chemale, F. (2008). Geochemistry of Volcanic Rocks from Faial Island (Azores). E-Terra. Revista Electrónica de Ciências da Terra. GEOTIC- Sociedade Geológica de Portugal. ISSN 1645-0388 Volume 5, n°1.
- Madureira, P., Moreira, M., Mata, J., Allègre, C.J. (2005) Primitive neon isotopes in Terceira Island (Azores archipelago). Earth and Planetary Science Letters 233: 429-440.

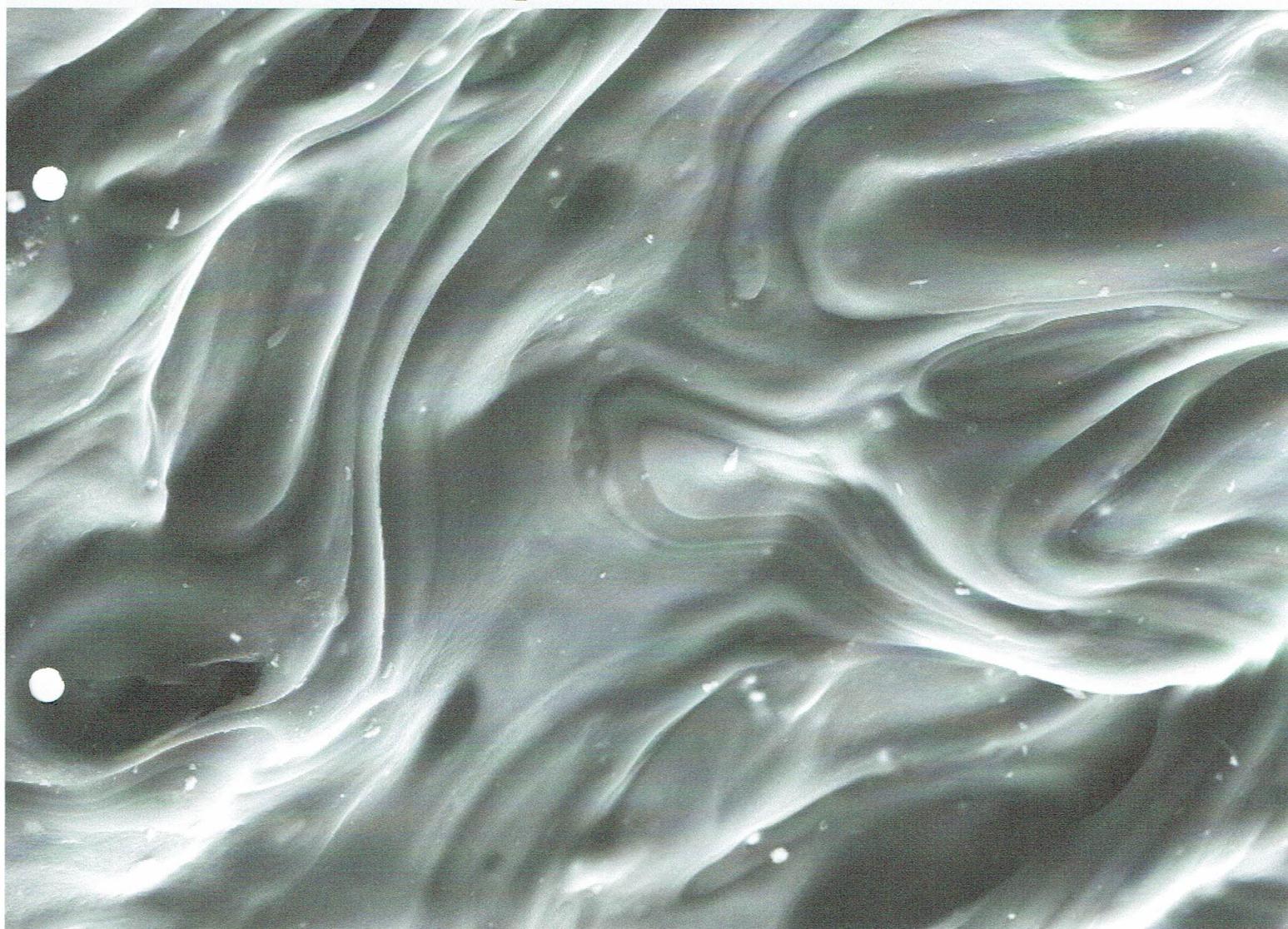
- Madureira, P., Mata, J., Moreira, M., Queiroz, G. (2006) Características elementares e isotópicas (He e Ne) das lavas da Terceira (Açores): implicações petrogenéticas. VII Congresso Nacional de Geologia, Évora; 195-196.
- Madureira, P., Mata, J., Moreira, M. (2008) The Ne isotopic signature of Terceira lavas (Azores): evidence for Ne recycling? Revista Electrónica de Ciências da Terra, 5, 11:1-8.
- Marriner, G.F., Norry, M.J., Gibson, I.L. (1982) The petrology and geochemistry of the Agua de Pau Volcano, São Miguel, Açores. Arquipélago. 3: 159-173.
- Maund, J. (1985) The Volcanic Geology, Petrology and Geochemistry of Caldeira Volcano, Graciosa, Azores and its bearing on contemporaneous felsic-mafic oceanic island volcanism. PhD Thesis, University of Reading, 333p..
- Meibom, A., Anderson, D. L., Sleep, N. H., Frei, R., Chamberlain, C. P., Hren, M.T., Wooden, J. L. (2003) Are high $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in oceanic basalts an indicator of deep-mantle plume components? Earth and Planetary Science Letters 6552: 1-8.
- Metrich, N., Bizouard, H., Varet, J. (1981) Pétrologie la série volcanique de l'île de Faial (Açores). Bull. Volcanol. 44 : 831-847.
- Monod, T., Varet, J. (1976) Découverte d'enclaves de syénites quartzifères et autres roches associées plutoniques dans l'Île de Flores (Açores). Bull. Soc. Geol. France 7, T.18, 6 : 1625-1630.
- Moreira, M., Doucelance, R., Kurz, M.D., Dupré, B., Allègre, C.J. (1999) Helium and lead isotope geochemistry of the Azores Archipelago, Earth and Planetary Science Letters 169 (1-2): 189-205.
- Moreira, M., Allègre, C.-J. (2002) Rare gas systematics on Mid Atlantic Ridge (37–40°N), Earth and Planetary Science Letters 198 (3-4): 401-416.
- Morrisseau, M. (1987) Les éruptions hydromagmatiques et les xenolites associés: signification géothermique. Exemples de Flores et de Faial (Açores). Thèse présentée pour obtenir le titre de docteur en Sciences de l'Université de Paris XI - Orsay. 317p.
- Mügge, O. (1883) Petrographische Untersuchungen na Gesteinen von den Azoren. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie 2: 189-244.
- Mungall, J. e Martin, R. (1995) Petrogenesis of basalt-comendite and basalt-pantellerite suites, Terceira, Azores, and some implications for the origin of ocean-island rhyolites. Contrib. Mineral Petrol, 119:43-55.
- Mungall, J. e Martin, R. (1996) Extreme differentiation of peralkaline rhyolite, Terceira, Azores: A modern analogue of strange lake, Labrador? The Canadian Mineralogist, 34:769-777.
- Nielsen, S.G., Rehkämper, M., Brandon, A. D., Norman, M.D., Turner, S., O'Reilly, S. Y. (2007) Thallium isotopes in Iceland and Azores lavas—Implications for the role of altered crust and mantle geochemistry Earth and Planetary Science Letters 264 (2007) 332–345
- Oskarsson, N., Rodrigues, B., França, Z., Almeida, M.H. (1994) Relatório de Progresso sobre o estudo petrográfico e geoquímico do Vulcão das Furnas (São Miguel, Açores). II A - Petrologia / Geoquímica. Programa Environment CE. Contract CEC reference ERB EV5V - CT92 - 0173.
- Oskarsson, N., Rodrigues, B., França, Z., Almeida, M.H. (1995) Relatório Final sobre o estudo petrográfico e geoquímico do Vulcão das Furnas (São Miguel, Açores). II B - Chemistry and petrogenesis of the Furnas volcanic center, São Miguel, Açores. Programa Environment CE. Contract CEC reference ERB EV5V - CT92 - 0173.
- Oskarsson, N., França, Z., Almeida, M.H., Rodrigues, B., (1998) Chemistry and petrogenesis of the Furnas volcanic center, São Miguel, Açores: polybaric fractionation of alkalic magma. In: R. Casale, M. Fytikas, G. Sigvaldason e G. Vougiokalakis (Ed.), Proceedings of the 2nd European Laboratory Volcanoes Workshop . Santorini (Grécia). European Commission-Volcanic Risk. DG XII-Environment and Climate, Programme, EUR 18161 EN; 541-548.
- Ribeiro, L., França, Z., Rodrigues, B., Forjaz, V.H. (2007a) First approach to geochemical study of São Jorge lavas, Azores. General Assembly, Vienna, Austria, 15 – 20 April.
- Ribeiro, L., França, Z., Rodrigues, B., Forjaz, V.H. (2007b) Preliminary geochemical analyses of São Jorge island, Azores. Goldschmit Conference. Colónia. Alemanha.
- Ribeiro, L.P.; França, Z., Forjaz, V. H., Abreu, M. P., EMEPC@team (2008) Estimated pressure and temperature during magma extraction beneath São Jorge Island, Azores Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-10548, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-10548 EGU General Assembly
- Ridolfi, F., Renzulli, A., Santi, P., Upton, B. (2003) Evolutionary stages of crystallization of weakly peralkaline syenites:evidence from ejecta in the plinian deposits of Agua de Pau volcano (São Miguel, Azores Islands). Mineralogical Magazine 67, 4: p. 749-767.
- Rodrigues, B. (2002) Condicionantes Geoestruturais da Evolução Geoquímica dos Vulcanitos da Ilha de Santa Maria. II Jornadas Internacionais de Vulcanologia da Ilha do Pico - Livro de Resumos, Abril. Lajes do Pico, 61-62.
- Rodrigues, B., Alves, C.M.A., Serralheiro, A., Forjaz, V.H. (1985) Nota prévia sobre a petrologia e geoquímica da ilha de Santa Maria, Açores. Memórias da Academia das Ciências, t.XXVI: 71-91.
- Rodrigues, B., Forjaz, V.H., Gaspar, J.L. (1989) A preliminary note on the geochemical evolution of volcanism in S. Miguel Island, (Açores). Doc. CV/INIC. 07/87.
- Rodrigues, B., Gaspar, J.L., Almeida, M.H., Queiroz, G., Pacheco, J., Wallenstein, N., França, Z., Ferreira, T. (1993) Relatório de Progresso sobre o estudo petrográfico e geoquímico do Vulcão das Furnas (São Miguel, Açores). I - Estratigrafia, amostragem e petrografia. Programa Environment CE. Contract CEC reference ERB EV5V - CT92 - 0173.
- Rodrigues, B., França, Z., Almeida, M.H. (1996) O estudo petrográfico e geoquímico do vulcão das Furnas (São Miguel, Açores - Laboratório das Furnas) I A - Petrologia / Geoquímica. Relatório de progresso.
- Santos, J.F., Acciaioli, M.H., França, Z., Nunes, J.C., Forjaz, V.H., Sousa, P., Palácios, T. (2005) Contribuição para o estudo das variações litogegeoquímicas do Vulcão do Fogo (Ilha de São Miguel – Açores). Actas da XIV Semana da Geoquímica e do VIII Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, 11 a 16 Julho, Aveiro. Universidade de Aveiro, Departamento de Geociências; 141-144.

- Schaefer, B., Turner, S., Parkinson, I., Rogers, N., Hawkesworth, C. (2002) Recycled Archaean oceanic mantle lithosphere in the Azores plume, *Nature* 420: 324– 327.
- Schilling, J.-G. (1975a) Azores mantle blob: rare-earth evidence. *Earth & Planet. Sci. Lett.* 25: 103-115.
- Schilling, J.-G. (1975b) Rare earth variations across “normal” ridge, 29S, and East Pacific Rise, 2-19 S, and evidence on the composition of the underlying low-velocity layer. *J. Geophys. Res.* 80: 1459-1473.
- Schmincke, H-U. (1973) Magmatic evolution and tectonic regime in the Canary, Madeira and Azores Islands Groups. *Geological Society of America Bulletin* 84: 633-648.
- Schmincke, H-U., Weibel, M. (1972) Chemical study of rocks from Madeira, Porto Santo, and São Miguel, Terceira (Azores). *N. Jb. Miner. Abh.* 117, 3: 253-281.
- Schmincke, H.U., Staudigel, H., Brey, G. (1982) Mantle heterogeneity in the North Atlantic – Evidence from oceanic islands. *Arquipélago* 3: 133-134.
- Self, S. (1973) Recent volcanism on Terceira, Azores. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy - Geology Department, Imperial College, London. 236p.
- Self, S., Gunn,B. M. (1976) Petrology, volume and age relations of alkaline and saturated peralkaline volcanics from Terceira, Azores. *Contrib. Mineral. Petrol.* 54: 293-313.
- Simon, N., Neumann, E.-R., Bonadiman, C., Coltorti, M., Delpech, G., Grégoire, M., Widom, E. (2008) Ultra-refractory domains in the oceanic mantle lithosphere sampled as mantle xenoliths at ocean islands. *Journal of Petrology*, 49, 6: 1223-1251
- Snyder, D., Widom, E., Pietruszka, A.J., Carlson, R. W., Schmincke, H.-U. (2007) Time scales of formation of zoned magma chambers: U-series disequilibria in the Fogo A and 1563 A.D. trachyte deposits, São Miguel, Azores *Chemical Geology* 239: 138–155
- Storey, M. (1981) Trachytic pyroclastics from Água de Pau volcano, São Miguel, Azores: evolution of a magma body over 4000 years. *Contrib. Mineral. Petrol.* 78: 423-432.
- Storey, M. (1982) Petrogenesis of the recent trachytic pyroclastic succession of Água de Pau Volcano (São Miguel, Azores) (Abstrct). *Arquipélago* 3: 175-176.
- Storey, M., Wolff, J.A., Balsley, S.D. (1984) Mixed-magma lavas from the zoned magma chambers of Água de Pau and Furnas volcanoes, São Miguel, Azores: evidence supporting crystal settling. *EOS (Transactions of the American Geophysical Union)* 65: 1122.
- Storey, M., Wolff, J.A., Norry, M.J., Marriner, G.F.(1989) Origin of hybrid lavas from Água de Pau volcano, São Miguel, Azores. In Saunders, A. & Norry, M. (eds.), 1989, *Magmatism in the Ocean Basins*, Geol. Soc. Sp. Publ. 42: 161-180.
- Tolstikhin, I.N., Kamensky, I.L., Forjaz, V.H., Polyak, B.G., Konodov, V.I., Kudryavtsev, D. (1991) Helium isotopes in the gases of São Miguel, the Azores Plateau. *Int. Geol. Rev.* 33, 9: 930–940.
- Turner, S., Hawkesworth, C., Rogers, N., King, P. (1997) U-Th isotope disequilibria and ocean island basalt generation in the Azores. *Chemical Geology* 139: 145-164
- Webster, J.W. (1821) A description of the island of St. Michael. R.P. & C. Williams Ed., Boston. 244 pp.
- White, W., Schilling, J.-G. (1978) The nature and origin of geochemical variations in Mid-Atlantic Ridge basalts from the Central North Atlantic. *Geochim. Cosmochim. Acta* 42: 1501-1516.
- White, W.M., Hart, S.R., Shilling, J-G. (1975) Geochemistry of the Azores and the Mid-Atlantic ridge: 29° N to 60°N. *Carnegie Institution Year Book* 224-234.
- White, W.M., Schilling, J-G., Hart, S.R. (1976) Evidence for the Azores mantle plume from strontium isotope geochemistry of the Central North Atlantic. *Nature* 263, 5579: 659-663.
- White, W.M., Tapia, M.D.M., Schilling, J-G. (1979) The petrology and geochemistry of the Azores Islands. *Contrib. Mineral. Petrol.* 69: 201-213.
- Widom, E. (1991) Petrogenetic processes and timescales of young alkaline volcanic rocks, São Miguel, Azores. Doctoral thesis, University of California Santa Cruz.
- Widom, E. (2006) Origin of Mantle Heterogeneity in the Azores: A Re-Os Isotope Perspective “4^{as} Jornadas Internacionais de Vulcanologia da Ilha do Pico. Livro de Resumos Alargados”. Maio. Lajes do Pico p. 73-75.
- Widom, E., Shirey, S.B. (1996) Os isotopo systematics in the Azores: implications for mantle plume sources. *Earth Plan. Sci. Lett.* 142: 451-465.
- Widom, E., Farquhar, J. 2003. Oxygen isotope signatures in olivines from São Miguel (Azores) basalts: implications for crustal and mantle processes, *Chemical Geology* 193, (3-4): 237-255.
- Widom, E., Palacz, J.B., Gill, J.B., Schmincke, H.-U. (1992) Th-Sr-Pb isotope correlations in the Azores, *EOS Fall*, 651.
- Widom, E., Gill, J.B., Schmincke, H.-U. (1993) Syenite Nodules as a Long-Term Record of Magmatic Activity in Agua de Pao Volcano, São Miguel, Azores. *Journal of Petrology* 34(5): 929-953.
- Widom, E., Carlson, R.W., Gill, J.B., Schmincke, H.-U. (1997) Th-Sr-Nd-Pb isotope and trace element evidence for the origin of the São Miguel, Azores, enriched mantle source, *Chemical Geology* 140 (1-2): 49-68.
- Yang, T., Yang S., Lee, S. Sean, Solomon, C., Hung, S.-H. (2006) Upper mantle structure beneath the Azores hotspot from finite-frequency seismic tomography. *Earth and Planetary Science Letters* 250:11–26.
- Yu, D., Fontignie, D., Schilling, J.-G. (1997) Mantle plume-ridge interactions in the Central North Atlantic: A Nd isotope study of Mid-Atlantic Ridge basalts from 30°N to 50°N, *Earth and Planetary Science Letters* 146 (1-2): 259-272.

Ciências Geológicas: Ensino, Investigação e sua História

Volume III

Geologia das Ilhas dos Arquipélagos dos Açores, Madeira e Geologia das antigas Colónias



Publicação Comemorativa do "ANO INTERNACIONAL DO PLANETA TERRA"

Associação Portuguesa de Geólogos
Sociedade Geológica de Portugal

J.M. Cotelo Neiva, António Ribeiro, Mendes Victor, Fernando Noronha, Magalhães Ramalho