

Recursos Hídricos da Ilha da Madeira

Madeira's Water Resources

S. Prada^(a), M.A. Gaspar^(b), M.O. Silva^(c), J.V. Cruz^(d), M. M. Portela^(e), G.R. Hora^(f)

RESUMO

Os recursos hídricos subterrâneos constituem a principal fonte de abastecimento na Madeira, ilha com cerca de 240 500 habitantes. A captação faz-se através de galerias, túneis, furos e do aproveitamento de nascentes. O volume anual de recursos subterrâneos consumido no abastecimento público, indústria, rega e produção de energia é de 185 000 000 m³. A recarga ocorre predominantemente nas zonas altas e planas da ilha. A parcela de recarga proveniente da chuva não é suficiente para manter as condições observadas no aquífero de base, sendo a recarga complementada por água proveniente dos nevoeiros retida pela vegetação. O modelo que melhor traduz a variação da precipitação com a altitude é uma regressão quadrática. O escoamento ocorrido na rede hidrográfica é consequência directa da precipitação mas também das reservas subterrâneas e do escoamento hipodérmico. O modelo hidrogeológico proposto para a ilha prevê a existência de aquíferos suspensos em altitude, relacionados com níveis impermeáveis; um aquífero de base com características distintas em função dos complexos vulcânicos; e aquíferos compartimentados por filões subverticais que atravessam intensamente o edifício vulcânico.

Palavras-Chave: Ilha da Madeira, precipitação, escoamento, escoamento à superfície do terreno, escoamento subterrâneo e hipodérmico, modelo hidrogeológico, hidrogeoquímica, recursos subterrâneos.

ABSTRACT

Madeira is the largest island of the Madeira archipelago, with an area of 737 km². The island was generated during Post-Miocene times until 6000-7000 years B.P. Groundwater resources are the main source of water supply for the 240 500 inhabitants of Madeira island. Groundwater exploitation is made by means of water galleries, tunnels, wells

(a) Departamento de Biologia e Centro de Estudos da Macaronésia da Universidade da Madeira, Campus Universitário da Pentadada, 9000-390 Funchal; e-mail: susana@uma.pt

(b) Investimentos e Gestão da Água S.A. e Centro de Estudos da Macaronésia, e-mail: alexandra@iga.pt

(c) Departamento de Geologia da FCUL, Edifício C2, Campo Grande – 1700 Lisboa; e-mail: mosilva@fc.ul.pt

(d) Departamento de Geociências da Universidade dos Açores; e-mail: jvc@notes.uac.pt

(e) Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico; e-mail: mgs@civil.ist.utl.pt

(f) Engenheiro do Território (IST)

and springs, corresponding to a total volume of groundwater of $185 \times 10^6 \text{ m}^3$ by year for domestic and industrial use, as well as for irrigation and electrical power production purposes. Recharge volume due to rainfall is not sufficient to maintain the actual balance between recharge and discharge at the basal aquifer, suggesting the fog contribution to recharge.

A quadratic regression model explains the variation of rainfall due to altitude effect. River discharge is the result of rainfall as well as a significant contribution of groundwater and hypodermic discharge.

Due to the geologic setting of the Madeira island the hydrogeological conceptual model includes the following domains:

- Basal groundwater: occurs after a certain depth. Is formed by geological units of the main and ancient volcanic complexes. The Main Volcanic Complex (CP) has high transmissivity values varying between 1.16×10^{-2} to $2.89 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$, low hydraulic gradients (3×10^{-4} to 6.4×10^{-3}) and groundwater with low to medium levels of mineralization (electrical conductivities between 100 e $500 \mu\text{S cm}^{-1}$). The Ancient Volcanic Complex (CA) has much lower transmissivity values, varying between 2.31×10^{-4} and, high hydraulic gradients (2×10^{-2}) and highly mineralised groundwater (groundwater electrical conductivity varies from 600 to over $3000 \mu\text{S cm}^{-1}$).

- Dike impounded groundwater: In the central part of the island, sub-vertical dikes that produce the lateral impoundment of the aquifer, with adjacent compartments having different hydraulic potentials, divide the basal groundwater level.

- Perched groundwater: It occurs in high parts of the island in relation to low permeability levels. This perched groundwater may be divided in shallow and deeper levels. The former are located at higher altitudes and are characterized by chloride type waters, with the lower mineralizations (electrical conductivity between 33 and $62 \mu\text{S/cm}$), temperatures and pH values. These levels are highly vulnerable to climate variations, with water levels varying significantly along the year depending on the rate of recharge. The later, although still located in island highlands are located at lower altitudes, containing waters with higher mineralizations and pH values.

The spatial distribution of the electrical conductivity shows an increase in the water mineralization with depth and with decreasing distances to the sea; however the water chemistry does not show signs of seawater intrusion.

The evaluation of groundwater resources shows that recharge is undervalued because fog precipitation is not included. Due to its importance deeper studies are suggested.

Key-words: Madeira island, precipitation, surface runoff, overland flow, groundwater and hypodermic flow, hydrogeological model, hydrogeochemistry, groundwater resources.

INTRODUÇÃO

O Arquipélago da Madeira situa-se no Atlântico Norte, entre os paralelos 30° 01' e 33° 08' e os meridianos 15° 51' e 17° 16'. Com a área total de 796,77 km², este arquipélago é formado pela Madeira, maior e principal ilha do arquipélago, com a área de 736,75 km²; pelo Porto Santo, com 42,17 km²; pelas Desertas (Deserta Grande, Bugio e Ilhéu Chão), com 14,23 km² de área total, e pelas Selvagens (Selvagem Grande e Selvagem Pequena), as mais pequenas ilhas do arquipélago, com 3,62 km².

A ilha da Madeira ergue-se acima de uma vasta planície submarina, no interior da placa africana, numa zona onde a crosta oceânica tem 130 Ma, formando um maciço vulcânico com mais de 5,5 km de altura, do qual apenas cerca de 1/3 se encontra emerso. Com 1861 m de altitude máxima (Pico Ruivo), 58 km de maior dimensão, no sentido E-W e 23 km de largura, a Madeira apresenta um relevo muito acentuado com 1/4 da sua superfície acima dos 1000 m de altitude e declives elevados. Cerca de 65% da superfície da ilha tem declives superiores a 25%, sendo as áreas planas, ou relativamente planas, escassas (Figura 1).

A forma do edifício vulcânico que lhe deu origem, o clima, a natureza e modos de jazida das rochas, desempenham papéis predominantes no modelado do relevo, tal como é conhecido actualmente. O aspecto geral actual da ilha, vista do mar, a certa distância, apesar do seu relevo contrastante e dos vales profundamente incisivos, é o de um escudo achatado dissecado pela erosão vertical, cujos bordos teriam sido quebrados pela erosão das vagas (RIBEIRO, 1985). São vulgares, ao longo de todo o seu contorno, as arribas com algumas centenas de metros de altura, sendo a ilha quase desprovida de costas baixas. Verifica-se uma dissimetria entre a vertente meridional, convexa, e a setentrional, côncava, da ilha da Madeira, devida ao mais rápido recuo das arribas a norte, em consequência de uma maior dinâmica hidráulica, resultante da predominância setentrional dos rumos eólicos.

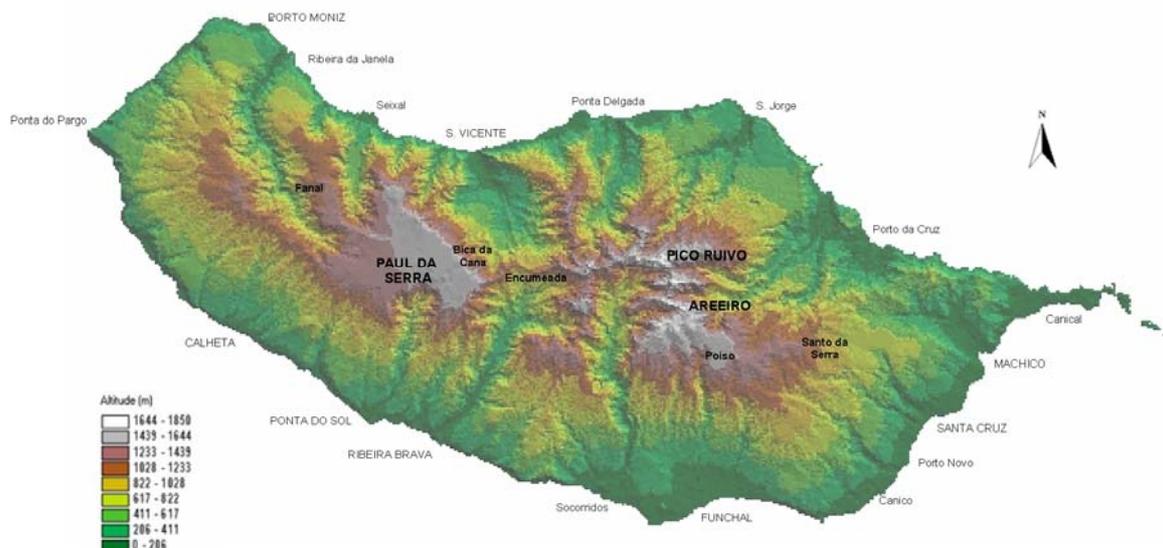


Figura 1 – Relevo da ilha da Madeira.

GEOLOGIA

A Madeira é um exemplo de magmatismo oceânico intraplaca (7% do magmatismo actual), consensualmente considerada um “hot-spot” (ponto quente) cuja actividade teve início antes do Miocénico superior, há mais de 5,2 Ma, FERREIRA *et al.* (1988), tendo-se prolongado até há 6 000/ 7 000 anos BP, GELDMACHER *et al.* (2000).

As rochas vulcânicas, básicas na sua maioria, constituem, em superfície e em volume, a quase totalidade da parte emersa da ilha, mais de 98% do material aflorante, condicionando fortemente a sua morfologia. As lavas são alcalinas predominando os litótipos de carácter pouco diferenciado – basanitos e basaltos alcalinos, estando as rochas intermédias apenas representadas em pequenos e raros afloramentos, nomeadamente a escoada mugearítica, os vários níveis freatomagmáticos com pedra pomes traquítica e alguns filões traquíticos, MATA (1996).

As formações sedimentares, importantes pelo facto de, nalguns casos, conterem fósseis, têm pouca representatividade na ilha, resumindo-se os sedimentos terrestres a aluviões e terraços, dunas fósseis (fossilíferas), fajãs, quebradas, depósitos de vertente e de enxurrada e os de fácies marinha, a conglomerados, calcários e calcarenitos fossilíferos, cascalheiras e areias de praia.

De acordo com o levantamento vulcano-estratigráfico mais recente da ilha da Madeira, PRADA & SERRALHEIRO (2000), é possível individualizar as seguintes unidades geológicas principais, formadas desde o Miocénico superior até à actualidade:

- **Complexo Vulcânico Antigo (CA)**

O Complexo Antigo compreende os afloramentos das rochas mais antigas da parte emersa, no actual nível de erosão da ilha. Embora, actualmente, bastante destruído, o CA constitui ainda uma grande mancha que as mais profundas ribeiras e a abrasão marinha vão pondo a descoberto, desde os 1600 m de altitude, nas zonas centrais da proto-ilha,

até ao nível do mar. Resultante de actividade subaérea, efusiva e explosiva, o CA é constituído por escoadas, cones e vastos campos de piroclastos, de todas as dimensões, encontrando-se profusamente cortado por filões e, em geral, muito alterado.

- **Calcários Marinhos dos Lameiros (CM)**

Actualmente, os calcários formam um afloramento de dimensão muito reduzida, localizado na margem direita da ribeira de S. Vicente, aproximadamente a 2,5 km da foz, a uma altitude de 380 m. O afloramento é constituído essencialmente por conglomerados, que se julga estarem na base daquele depósito sedimentar marinho, restando, no topo, alguns vestígios dos calcários fossilíferos.

- **Depósito Conglomerático-Brechóide (CB)**

Esta formação sedimentar é constituída por espessos depósitos de enxurrada, bastante compactados e cimentados. Formado em clima muito diferente do actual, caracterizado por abundantes e concentradas chuvadas, este depósito conglomerático-brechóide, o CB, é constituído por, aproximadamente, 95% de clastos, em geral muito mal calibrados, com dimensões que vão desde escassos milímetros até cerca de 2 metros de maior dimensão. Quanto ao rolamento dos clastos, variam de angulosos, a grande maioria, a subangulosos, encontrando-se ainda calhaus rolados, principalmente os de menores dimensões. São frequentes, no interior da formação, intercalações arenosas e/ou puramente conglomeráticas.

- **Complexo Vulcânico Principal (CP)**

Trata-se do complexo vulcânico que ocupa, quer em área, quer em volume, a maior parte emersa da ilha, tendo-se prolongado a sua formação por um longo período de tempo. As suas rochas são responsáveis pelas maiores altitudes actuais, assim como pelas plataformas estruturais que ainda hoje se encontram na ilha.

Foi possível distinguir duas séries correspondentes a fases eruptivas diferentes, designadas por série superior e série inferior. Se, nalgumas áreas, é possível pô-las em evidência, noutras, esse contacto dilui-se. Na designação de Complexo Principal inferior incluem-se as primeiras erupções deste complexo, caracterizadas por alternância de materiais explosivos e efusivos, representados por grandes cones de piroclastos e escoadas espessas e extensas, designadas por mantos, que se encontram, desde medianamente alterados a muito alterados, com os piroclastos, na maior parte das vezes, transformados em tufos. O CP superior caracteriza-se por actividade essencialmente efusiva, de origem predominantemente fissural, que originou empilhamentos de espessos mantos, com alguns níveis de piroclastos intercalados, de pequena espessura e extensão. As escoadas desta série são sub-horizontais, inclinando suavemente para a periferia da ilha.

- **Complexo Vulcânico S. Roque/Paul (SRP)**

Este complexo formou-se posteriormente ao entalhe dos grandes vales das ribeiras com posicionamento semelhante ao actual. Caracteriza-se por actividade vulcânica relativamente reduzida, com pouca representatividade em termos de volume emerso da ilha. As erupções, localizadas, foram essencialmente do tipo estromboliano, tendo, a maior parte das escoadas, preenchido total ou parcialmente alguns dos vales então existentes (Seixal, São Vicente, São Roque do Faial, Machico - Figura 1). A sua maior expressão, em termos de área, situa-se no topo do maciço do Paul da Serra, onde se estende por uma superfície superior a 25 km², ocupando todo o chão do Paul, prolongando-se para norte, para a Terra Chã e Montado dos Pessegueiros, e para NW, para o Fanal.

- **Episódios Vulcânicos Recentes (VR)**

A esta designação corresponde a actividade vulcânica que ocorreu desde há 120 000 anos até há 6 000/7000 anos. Trata-se de episódios vulcânicos bem localizados, essencialmente do tipo explosivo, com taxas de erupção reduzidas, situados, na sua maior parte, no Funchal e arredores, mas também no Paul da Serra e no Porto Moniz.

- **Depósitos Sedimentares Recentes**

Depósitos de vertente; fajãs; quebradas; depósitos de enxurrada recentes; areias de praia; dunas fósseis; terraços e aluviões. Recentemente durante a abertura dos túneis da Encumeada (rodoviário e hidráulico) e da galeria da Fajã da Ama foram encontradas, associadas a falhas, saídas de águas termais contendo teores elevados de CO₂ livre. A persistência dos gases parece indicar não se tratar de gases acumulados nas rochas mas sim de manifestações secundárias de vulcanismo.

CLIMATOLOGIA

O clima na Madeira é condicionado, principalmente, pela intensidade e localização do anticiclone subtropical dos Açores, tendo a configuração e orientação do relevo um papel importante. Nesta região do Atlântico, aquele anticiclone transporta na sua circulação massas de ar tropical marítimo subsidente, especialmente na parte oriental onde os fenómenos de subsidência são frequentes e intensos, onde ocorrem os ventos de Nordeste (Alísios) na baixa troposfera, predominando durante todo o ano, FERREIRA (1955).

O relevo, além do efeito da altitude, tem um efeito de diferenciação climática local, sobretudo por estar orientado perpendicularmente à direcção predominante do vento, resultando que a temperatura do ar e a quantidade de precipitação possam ser bastante diferentes à mesma cota, mas em encostas com diferentes exposições aos ventos predominantes.

Os valores anuais médios da precipitação aumentam com a altitude, sendo em regra maiores na encosta norte do que na encosta sul, para a mesma altitude. As maiores precipitações ocorrem na Bica da Cana, a 1 560m de altitude, com um máximo de 2966,5 mm/ano, decrescendo acima desta cota. Nas terras baixas da encosta sul da ilha, como o

Funchal e o Lugar de Baixo, registam-se os valores mais baixos de precipitação anual, 513 mm e 583 mm, respectivamente.

Quanto aos valores médios anuais da temperatura do ar, verifica-se que dependem da altitude do local (diminuem quando a altitude aumenta) e da sua exposição. Na encosta sul a temperatura atinge valores mais elevados do que na encosta norte, 19,4°C no Lugar de Baixo, 18,8°C no Funchal e 17,5°C nas regiões litorais do norte. Nas regiões altas do interior da ilha a temperatura chega a atingir valores médios de 9,1°C, ocorrendo frequentes temperaturas mínimas abaixo de 0°C, sendo comum a queda de neve pelo menos uma vez por ano, embora apenas por alguns dias.

Em relação à humidade relativa do ar, o correspondente valor anual médio está compreendido entre 75 e 90%, classificando-se como húmido para quase a toda a ilha, excepto para o Funchal, Lugar de Baixo e Areeiro, que varia entre 55 e 75%.

Os ventos dominantes na Madeira são os de nordeste, ocorrendo 56 a 58% das vezes de Abril a Setembro. Aos ventos de oeste, com uma ocorrência de 20 a 22%, está associada abundante queda de precipitação. O vento de norte que sopra essencialmente no Inverno (10 a 12%) é extremamente tempestuoso, provocando neve nas terras altas. Os ventos de sul e de leste são mais raros e de pouca duração, fazendo subir a temperatura acima de 30°, principalmente nas terras altas.

Os valores médios da nebulosidade na Madeira são maiores do que sobre o mar na região em que está situada, o que se explica pela formação de nuvens e nevoeiros orográficos, i.e., o ar húmido marítimo ao encontrar a ilha, barreira montanhosa perpendicular à direcção predominante do vento, de nordeste, vai sofrer uma subida forçada ao longo da encosta. O ar que foi obrigado a subir, arrefece adiabaticamente, condensando-se em pequenas partículas que ficam em suspensão na atmosfera, constituindo nuvens ou nevoeiros, consoante a condensação se dá em altitude ou junto da superfície do globo, FERREIRA (1955).

Na Madeira os nevoeiros são quase exclusivamente orográficos, formando-se a barlavento da elevação, com tendência para se dissiparem a sotavento, sendo a variação anual da frequência pouco nítida, atingindo, na Bica da Cana, 235 dias/ano, e no Areeiro 229 dias/ano.

Em relação à variação em altitude, as massas de ar húmido podem começar a condensar a altitudes relativamente baixas, a partir dos 400 m, até altitudes de cerca de 1600 m, fixando-se a cobertura nebulosa entre os 600-800 m e os 1600 m, no Inverno, descendo mais abaixo, no Verão.

Esta persistente e espessa cobertura nebulosa, responsável, na presença de vegetação, pelo fenómeno da precipitação oculta, constitui, de acordo com PRADA & SILVA (2001), um recurso de elevado potencial hídrico. Foram obtidos sob uma *Erica arborea* L. (urze com cerca de 14 m³ de volume de copa), no Paul da Serra – local com condições bastante favoráveis – precipitações médias de 45mm/d, o que corresponde a 10 500 mm/ano (45 mm/d x 235 dias de nevoeiro), valor três vezes e meia superior ao da precipitação anual média daquela zona.

Variação Espacial e Temporal da Precipitação

A rede udométrica da ilha da Madeira é composta por 51 postos, com períodos de funcionamento consideravelmente longos: 31% dos postos apresentam mais de 30 anos de observação e 23%, entre 20 e 30 anos, sendo, contudo, frequentes as interrupções de medição.

Para que os registos hidrológicos utilizados no estabelecimento de modelos possuam um conteúdo informativo adequado à correcta apreciação dos fenómenos modelados, é necessário que as séries daqueles registos se refiram a períodos suficientemente longos, representativos, tanto da variabilidade temporal dos fenómenos, como dos seus valores médios. Por esta razão e após uma selecção prévia dos postos a utilizar (por exibirem séries mais longas), procedeu-se ao preenchimento de falhas nos registos de precipitação em 27 dos postos pré-seleccionados. Para o efeito, foram aplicadas análises de regressão linear simples com termo aleatório estabelecidas entre séries de precipitação relativas a um mesmo mês, exibindo correlação significativa entre si e medidas em dois postos udométricos próximos, um dos quais objecto de preenchimento.

Com o objectivo de analisar o efeito do acréscimo de altitude, h (m), no acréscimo da precipitação anual média, P (mm), ensaiaram-se três modelos de regressão: linear simples; quadrática e exponencial. Tais modelos foram aplicados ao conjunto de todos os postos e considerando separadamente os postos localizados nas vertentes norte ou sul, uma vez que é possível identificar diferentes regimes hidrológicos naquelas duas vertentes (as chuvas, os nevoeiros e os orvalhos apresentam, na vertente norte, frequência e intensidade muito superiores às verificadas na vertente sul).

As regressões efectuadas conduziram a coeficientes de correlação (r) que embora próximos, se revelaram ligeiramente superiores no caso da regressão quadrática que, assim, foi adoptada para representar o fenómeno. Tendo em conta os coeficientes de correlação alcançados, verifica-se que se obtém um ajuste ligeiramente melhor considerando separadamente as encostas norte e sul da ilha.

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 2.

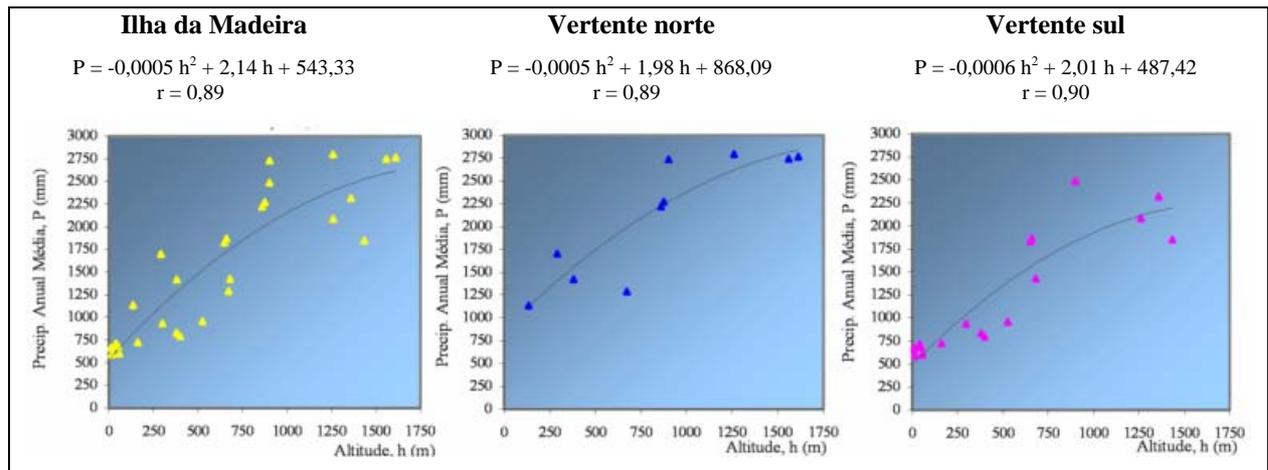


Figura 2 – Relações entre a precipitação anual média e a altitude estabelecidas considerando todos os postos da ilha e separadamente os postos localizados nas vertentes norte e sul.

Com frequência, a rede udométrica não se estende até às zonas acidentadas inseridas a cotas mais elevadas devido aos condicionamentos de acesso que decorrem do relevo e que introduzem dificuldades acrescidas na exploração e manutenção daquela rede. Tal motivo pode conduzir a que a caracterização da variação espacial da precipitação em zonas englobando relevos acentuados possa enfermar de falta de rigor, por se apoiar em informação insuficiente.

Assim, as relações apresentadas constituem uma ferramenta útil em problemas futuros envolvendo a caracterização do regime pluviométrico na ilha da Madeira.

Convém referir que o efeito da altitude poderá não ser suficiente, por si só, para explicar a diversidade dos campos de precipitação em ilhas. Outros parâmetros, como o declive do terreno e a conseqüente influência nos movimentos ascendentes das massas de ar, a orientação das encostas relativamente às direcções preferenciais de avanço das massas ar húmido, o afastamento à linha de costa e a orientação dos vales, poderão também contribuir para justificar as correlações verificadas entre acréscimos de precipitação e de altitude, RODRIGUES (1995).

PRADA (2000) demonstrou a variação da precipitação com o afastamento costeiro, tendo definido a existência de uma zona central onde se verifica uma diminuição da precipitação com o embrenhamento insular.

GASPAR (2001) analisou a variação espacial da precipitação anual média e mediante o recurso a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), designadamente o ArcView, obteve o mapa de isoietas anuais médias na ilha da Madeira – Figura 3. De entre os métodos de ponderação espacial implementados no ArcView, utilizou o IDW (*inverse distance weighting*), baseado nos doze postos mais próximos e no coeficiente de ponderação de três, com a precipitação anual média na ilha da Madeira de 1636 mm.

Neste mapa é notório o efeito da altitude na não uniformidade espacial da precipitação, sendo visíveis duas zonas com máximos de precipitação bem demarcados associadas, do lado oeste da ilha, à área do planalto do Paul da Serra, e do lado leste, à zona dos Picos do Areeiro e Ruivo.

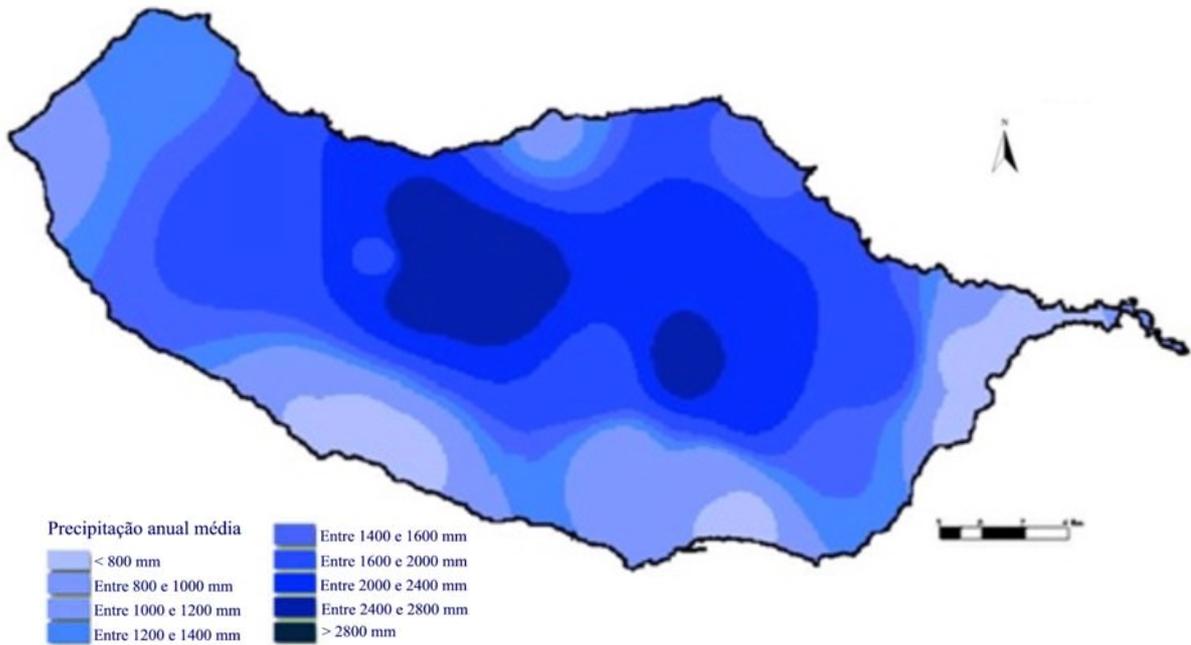


Figura 3 – Precipitação anual média na ilha da Madeira.

De modo a avaliar a variação temporal da precipitação, GASPAR (2001) atribuiu à precipitação anual média estimada para a ilha da Madeira o padrão de ocorrência mensal apresentado na Figura 4, calculado com base na totalidade dos registos de precipitação disponíveis da ilha da Madeira e no qual as precipitações médias mensais expressas em percentagem da precipitação anual média.

Verifica-se que a distribuição da precipitação é variável ao longo dos meses do ano, sendo, na média dos anos, mais intensa nos meses de Outubro a Maio e correspondendo o período menos chuvoso ao de Julho a Setembro.

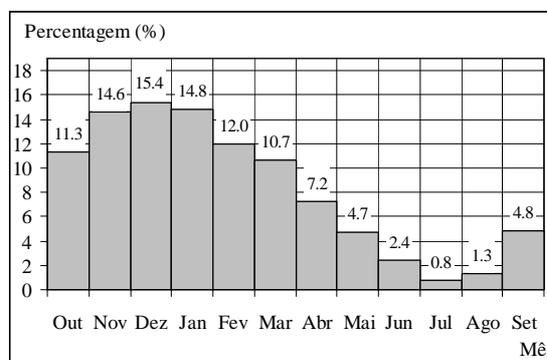


Figura 4 – Precipitações médias mensais na ilha da Madeira expressas em percentagem da precipitação anual média. GASPAR e PORTELA (2002).

RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS

A avaliação das disponibilidades hídricas superficiais na ilha da Madeira apresenta acentuada dificuldade e considerável incerteza em virtude da reconhecida escassez de dados hidrológicos, muito em especial dos referentes a escoamentos em que o número de pontos de medição e a dimensão dos períodos de registos são nitidamente insuficientes.

Tal escassez é tanto mais pertinente quanto existem factores adicionais, designadamente relacionados com a rede de levadas e com a circulação subterrânea, que interferem de modo significativo e complexo com as manifestações superficiais do escoamento e que, conseqüentemente, dificultam a interpretação dos processos ocorrentes. Acresce que o conhecimento inerente àqueles factores adicionais é frequentemente também insuficiente, GASPAR e PORTELA (2002).

Reconhece-se, aliás, que a exploração e manutenção da rede hidrométrica na ilha da Madeira são bastante difíceis, pois, em consequência do regime torrencial dos cursos de água naturais associado ao acidentado relevo, é frequente ocorrerem no Inverno desprendimentos e arrastamentos de blocos rochosos que obstruem as secções de medição ou danificam os equipamentos e estruturas nelas existentes, com conseqüente interrupção da medição das alturas hidrométricas. Surgem, deste modo, inúmeras falhas de registos durante períodos por vezes extensos ou mesmo abandono de estações.

Em consequência dos aspectos anteriormente mencionados, os modelos destinados a avaliar o escoamento na ilha da Madeira propostos por GASPAR (2001) apenas puderam utilizar os registos fornecidos pelas seguintes seis estações hidrométricas: Poço, Alviães, Ameixieira, Ponte Rodoviária, Sítio de São Vicente e Rosário.

De modo a apreciar o andamento geral das séries hidrológicas e a detectar eventuais especificidades das mesmas, aquela autora elaborou diagramas cronológicos das precipitações mensais e dos escoamentos mensais (expressos em altura de água) nas bacias hidrográficas das seis estações hidrométricas seleccionadas. Anota-se que as anteriores precipitações mensais foram obtidas por ponderação, de acordo com o método de Thiessen, das precipitações mensais nos postos udométricos com influência nas bacias hidrográficas das estações hidrométricas seleccionadas.

Os diagramas cronológicos assim obtidos revelaram a existência de períodos frequentes, especialmente no semestre de verão (de Abril a Setembro), com escoamentos mensais que podem exceder muito significativamente as precipitações nesses meses. Para tais ocorrências admite-se que possam assumir especial importância a contribuição das nascentes e do escoamento subsuperficial em cada bacia hidrográfica. No pressuposto que a contribuição em

apreço proviria fundamentalmente das reservas subterrâneas, GASPAR (2001) procedeu à sua avaliação, embora de modo necessariamente aproximado, por forma a inclui-la no balanço hidrológico a nível da bacia hidrográfica.

A Figura 5 exemplifica os resultados obtidos por GASPAR (2001) para a estação hidrométrica do Sítio de São Vicente. A Figura 5-a contém os diagramas cronológicos da precipitação mensal e do escoamento mensal registado e, a Figura 5-b, os diagramas cronológicos daquela mesma precipitação e do escoamento à superfície do terreno. Por escoamento à superfície do terreno designa-se a parcela do escoamento total que, deslocando-se à superfície do terreno, aflui à rede hidrográfica em consequência directa da precipitação sobre a bacia hidrográfica. No caso das estações hidrométricas consideradas no estudo, a parcela em menção foi obtida mês a mês, mediante a dedução ao escoamento total registado nesse mês da estimativa da correspondente contribuição mensal média das reservas subterrâneas. Tal contribuição, a que se atribuiu a designação de escoamento hipodérmico e subterrâneo, foi expeditamente avaliada a partir da análise de diagramas cronológicos de precipitações mensais e de escoamentos totais mensais registados, do tipo do exemplificado na Figura 5, e de medições de caudal em nascentes.

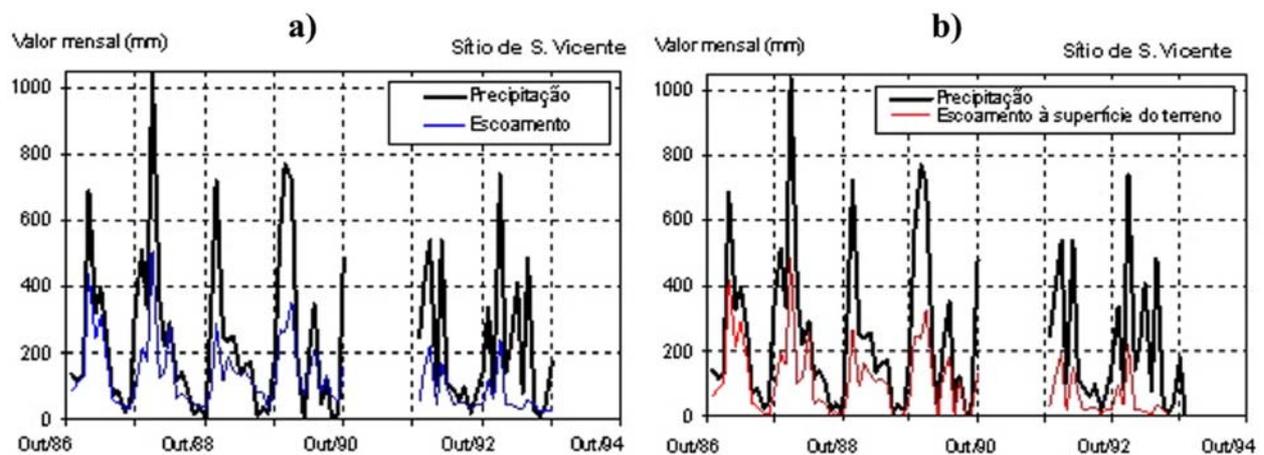


Figura 5 – Estação hidrométrica do Sítio de São Vicente. a) Precipitação mensal e escoamento mensal e b) precipitação mensal e escoamento mensal à superfície do terreno. (adaptada de GASPAR e PORTELA, 2002).

Tendo por base as estimativas, para as seis estações hidrométricas analisadas, do escoamento total e das suas duas parcelas de escoamento superfície do terreno e de escoamento hipodérmico e subterrâneo e com vista a avaliar, quer aquele escoamento total, quer as suas parcelas em qualquer secção da rede hidrográfica da ilha da Madeira, GASPAR (2001) e GASPAR E PORTELA (2002) estabeleceram:

- no que respeita à parcela de escoamento à superfície do terreno, modelos lineares de transformação, à escala mensal, da precipitação naquele tipo de escoamento;

- relativamente às contribuições provenientes das reservas subterrâneas e do escoamento hipodérmico, uma relação linear entre os valores anuais médios do escoamento à superfície do terreno e do escoamento subterrâneo e hipodérmico.

PORTELA *et al.* (2002), mediante o recurso a SIG, procederam à aplicação sistemática dos anteriores modelos a noventa e cinco bacias cobrindo a quase totalidade da ilha da Madeira. Para cada bacia obtiveram, primeiramente e por transformação das precipitações mensais médias na mesma, os escoamentos à superfície do terreno mensais médios e, por acumulação, anual médio. A partir deste último resultado avaliaram, de seguida, o escoamento subterrâneo e hipodérmico anual médio que, adicionado à parcela de escoamento à superfície do terreno, conduziu, por fim, ao escoamento total anual médio. Os resultados relativos às noventa e cinco bacias hidrográficas analisadas permitiram o traçado dos mapas de isolinhas anuais médias dos diferentes tipos de escoamento em presença, apresentados na Figura 6.

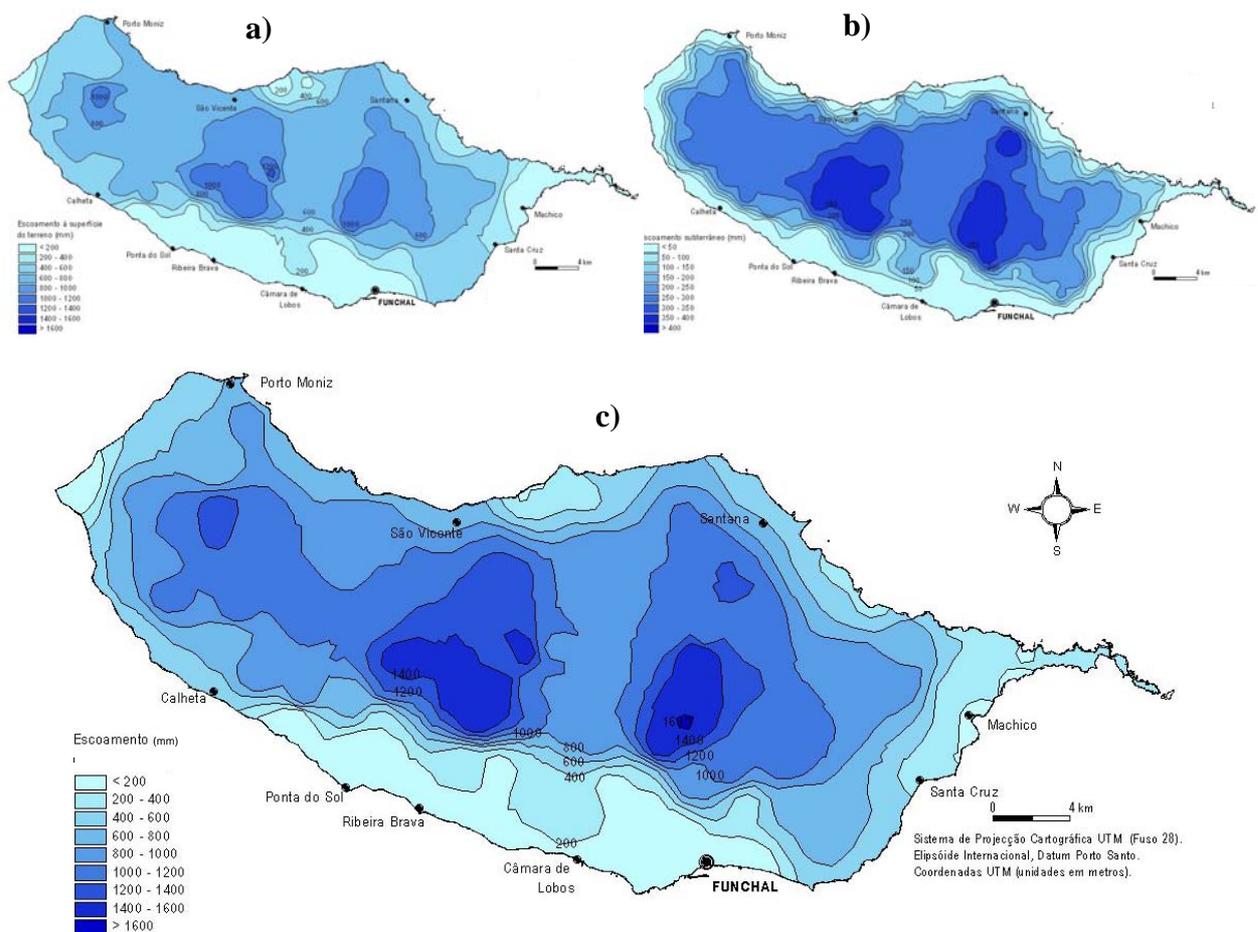


Figura 6 – Isolinhas anuais médias do: a) escoamento à superfície do terreno (mm); b) escoamento subterrâneo e hipodérmico (mm) e c) escoamento total (mm). (adaptada de PORTELA *et al.*, 2002).

No quadro seguinte indicam-se os escoamentos anuais médios que, mediante aplicação do SIG, resultaram dos mapas de isolinhas, tanto para a totalidade da ilha da Madeira, como para as encostas norte e sul.

Quadro 1 – Escoamentos anuais médios na ilha da Madeira. PORTELA *et al.* (2002)

Zona		Escoamento à superfície do terreno (mm)	Escoamento subterrâneo e hipodérmico (mm)	Escoamento total (mm)
Encosta	Norte	681,5	219,3	900,8
	Sul	504,4	189,2	693,6
ilha da Madeira		582,1	202,3	784,4

RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

Na Madeira, durante o Verão, as águas subterrâneas constituem a única fonte de abastecimento de água, sendo, por ora, suficientes para garantir as necessidades de consumo, apesar de as disponibilidades não se distribuírem uniformemente no espaço e no tempo. Durante o Inverno é aproveitado parte do escoamento superficial de algumas ribeiras.

Os recursos hídricos subterrâneos assumem, assim, grande importância no potencial endógeno ambiental da Madeira. Dadas as condições muito particulares do relevo da ilha, parte dos seus recursos hídricos subterrâneos destina-se, além do abastecimento público e rega, à produção de energia eléctrica. A energia hidroeléctrica produzida em 7 centrais representa cerca de 20 a 25% da produção total de energia, com uma produção de 100 a 120 GWh/ano, sem qualquer prejuízo para o abastecimento urbano e rega, havendo, deste modo, um duplo aproveitamento dos recursos hídricos.

A captação da água subterrânea processa-se através de perfurações horizontais, as galerias e os túneis (a galeria tem apenas uma abertura, um túnel tem duas, pelo que pode ser atravessado); de perfurações verticais, os furos; e do aproveitamento do caudal das nascentes.

O aproveitamento das nascentes faz-se através de um sistema de mais de 200 levadas que contornam a ilha numa extensão total de mais de 1000 km. As levadas são canais estreitos (80 cm de largura máxima) mas extensos escavados na rocha, destinados a captar e conduzir as águas drenadas pelas muitas nascentes que brotam da ilha, contrariando o seu curso normal para o mar.

As galerias são construídas nas zonas mais elevadas da ilha, de modo a atravessar formações mais recentes e mais permeáveis, tendo o cuidado de não passar sobre o nível freático, possibilitando que a água circule por gravidade.

Estas penetram no terreno horizontalmente (500 m a 3000 m), até cortarem o nível de saturação (Figura 7). Contudo,

variações do clima, variando os seus caudais ao longo do ano hidrológico, consoante a recarga, chegando mesmo alguns deles a esgotar.

Os aquíferos suspensos profundos, apesar de se situarem, ainda, no domínio de altitude, encontram-se a cotas mais baixas, possuindo circuitos subterrâneos superiores, de onde resultam águas um pouco mais mineralizadas e pH mais elevados do que os anteriores.

- Aquífero de Base

Apesar das heterogeneidades e descontinuidades que caracterizam os terrenos vulcânicos, parece existir na Madeira, a partir de uma certa profundidade, um aquífero de base. Este aquífero possui características distintas, consoante seja em formações do Complexo Principal, ou do Complexo Vulcânico Antigo, que constitui o núcleo da ilha.

Assim, no primeiro caso, em materiais do Complexo Principal, o aquífero caracteriza-se, em geral, por elevadas transmissividades que vão desde 1000 a 25000 m²/d (Quadro 2), gradientes piezométricos baixos, desde 0,0003 a 0,0064, e águas medianamente mineralizadas (condutividades entre 100 e 500 µS/cm).

Por outro lado, em formações do Complexo Antigo, na maioria, muito alteradas, onde se encontram basaltos já argilificados e piroclastos transformados em tufos, por serem as formações mais antigas existentes na ilha (Miocénico superior), o aquífero caracteriza-se por transmissividades mais baixas, 17 a 2263 m²/d (Quadro 2), águas, em geral, bastante mais mineralizadas (condutividades que chegam a atingir 3300 µS/cm), e gradientes piezométricos mais elevados, em média 0,02.

Quadro 2 - Transmissividade calculada pelo Método de Logan

Referência	Localização	T (m ² /d)	Unidade Geológica	Situação
JK1	Socorridos	2229	Complexo Principal	Em exploração
JK2	Socorridos	9413	Complexo Principal	Em exploração
JK3	Socorridos	2969	Complexo Principal	Em exploração
JK4	Socorridos	9251	Complexo Principal	Em exploração
JK5	Socorridos	8260	Complexo Principal	Em exploração
JK6	Machico	17	Complexo Antigo	Abandonado
JK7	Machico	199	Complexo Antigo	Em exploração
JK8	Machico	91	Complexo Antigo	Em exploração
JK9	Porto Novo	1487	Complexo Principal	Em exploração
JK10	Porto Novo	4179	Complexo Principal	Em exploração
JK11	Santo da Serra	11	Complexo Principal	Em exploração
JK12	Machico	2263	Complexo Antigo	Em exploração
JK13	Machico	684	Complexo Antigo	Em exploração
JK14	Santa Cruz	10800	Complexo Principal	Em exploração
JK15	Santa Cruz	7808	Complexo Principal	Em exploração
JK16	Socorridos	127	Complexo Principal	Em exploração
JK17	Santa Cruz (Boaventura)	864	Complexo Principal	Em exploração
JK18	Funchal (João Gomes)	1054	Complexo Principal	Em exploração
JK19	Funchal (S. João)	1304	Complexo Principal	Em exploração
JK20	Funchal (Sta Luzia)	998	Complexo Principal	Em exploração
JK21	Santa Cruz (Boaventura)	7529	Complexo Principal	Em exploração
JK22	Santo da Serra	13	Complexo Principal	Em exploração
JK23	Canico	25766	Complexo Principal	Em exploração
JK24	Madalena do Mar	11	Complexo Principal	Abandonado
JK25	Câmara de Lobos	1865	Complexo Principal	Em exploração

Apesar do gradiente piezométrico baixo, observado nas formações do Complexo Principal, do litoral da ilha, propõe-se uma ligação entre a zona profunda, saturada, do domínio de altitude, com a zona saturada do litoral, definindo-se, assim, um aquífero vulcânico generalizado que culmina no interior da ilha, acima da cota 1000 m. Este modelo está representado no esquema hidrogeológico da Figura 8.

A relação proposta entre o domínio de altitude e o domínio litoral, necessita, para ser válida, de um aumento rápido do gradiente desde as zonas litorais para o centro do maciço, até cerca dos 1100/1200 m (uma vez que existem galerias até à cota 1030 m), que poderá ser explicado pelas seguintes circunstâncias:

1. as formações vulcânicas tornam-se cada vez menos permeáveis para o interior da ilha (formações alteradas do Complexo Principal inferior e do Complexo Antigo);
2. existência de uma formação sedimentar impermeável, espessa e extensa, o Depósito Conglomerático Brechóide;
3. A quantidade de filões aumenta progressivamente para o interior do edifício vulcânico contribuindo para a diminuição da sua permeabilidade horizontal;

4. e, ainda, pelo facto de a recarga ocorrer, predominantemente, nas zonas altas e planas do interior da ilha.

- Aquíferos Compartimentados

Dado que o vulcanismo na Madeira é, essencialmente, do tipo fissural, todo o edifício vulcânico está intensamente cortado por filões subverticais (Figura 8) que no caso de serem menos permeáveis do que o encaixante limitam e compartimentam o aquífero de base dando origem a variações bruscas de potencial entre compartimentos contíguos (como se pôde observar durante a escavação de algumas galerias).

Outra consequência da compartimentação do meio vulcânico, é a possibilidade de existirem, abaixo do nível de saturação regional, compartimentos ou células secas, localizados em zonas que não recebem recarga.

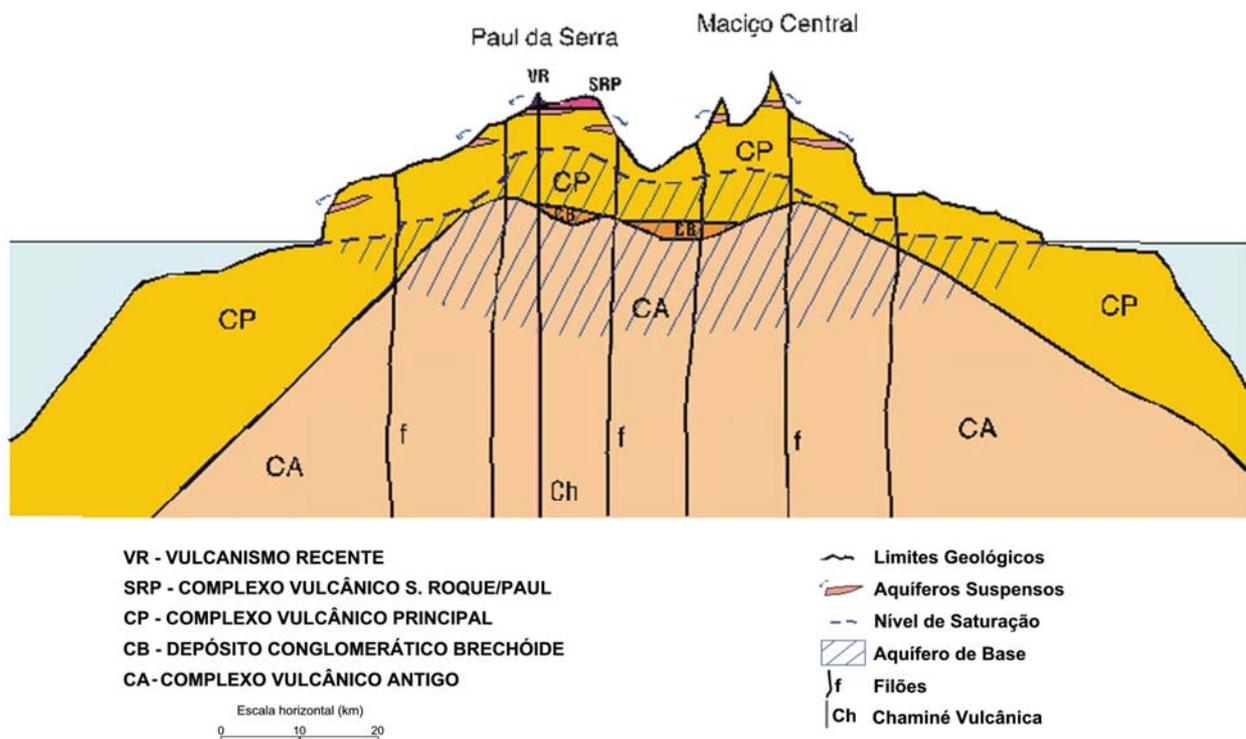


Figura 8 – Modelo hidrogeológico conceptual para a ilha da Madeira.

- Esquema de Fluxo Subterrâneo na Madeira

As principais zonas de recarga situam-se nas zonas mais altas da ilha, principalmente nas de menor declive, onde a precipitação atinge valores elevados e as formações vulcânicas são mais recentes e, em geral, mais permeáveis, como é o caso, entre os mais importantes, do planalto do Paul da Serra e seu prolongamento para o Fanal, Santo da Serra e área compreendida entre o Chão dos Balcões/ Poiso/ João do Prado.

Nestas zonas, o fluxo é predominantemente descendente, não saturado, originando aquíferos suspensos em relação com níveis pouco permeáveis e de pequena extensão que, em certas condições morfológicas e estruturais favoráveis, originam nascentes.

Quando os níveis pouco permeáveis são extensos e espessos, funcionam como aquíferos, exercendo drenância descendente constante para os níveis mais profundos. A eles estão associadas as galerias com circuitos estabilizados, cujo caudal (85 l/s) não varia ao longo do ano hidrológico, como é o caso da galeria do Porto Novo.

A partir de uma certa profundidade, acima dos 1000 m de altitude (no maciço do Paul da Serra), entra-se na zona saturada limitada superiormente por uma superfície freática e inferiormente por uma interface (água doce/ água salgada), cuja posição depende da configuração da superfície freática. Quando o nível de saturação coincide com uma formação permeável, o nível é real, mas, quando coincide com uma formação impermeável, o nível é virtual, razão pela qual certas galerias não são imediatamente produtivas ao atravessarem o nível de saturação regional.

Daqui resulta que a configuração da zona saturada possa, em função da heterogeneidade do meio vulcânico, vir a ser altamente irregular.

A localização dos acidentes tectónicos FONSECA *et al.* (2000), é de grande importância uma vez que se tem verificado que a circulação subterrânea se faz preferencialmente na rede de fracturas a eles associada como se pode observar na galeria da Fajã da Ama, no Túnel dos Tornos, no Túnel do Norte, etc.,.

Caracterização Hidroquímica

A caracterização física e química das águas subterrâneas da ilha da Madeira baseou-se na análise de 39 amostras representativas de nascentes, furos, túneis e galerias de captação (Quadro 3).

A temperatura das águas subterrâneas da ilha da Madeira diminui, tal como a temperatura do ar, com a altitude (Figura 9), de acordo com a seguinte relação, em que T é a temperatura, em °C e C a cota, em m:

$$T = 17,22 - 0,0056 * C$$

No entanto, a temperatura das águas é, na maioria dos casos, mais baixa do que a do ar, para a mesma cota. Cerca de 70%, são águas frias, o que se deve a um rápido circuito através de um meio, em geral, muito transmissivo: o Complexo Principal. No entanto, as águas que circulam no Complexo Antigo, constituído, na sua maioria, por formações vulcânicas alteradas, pouco permeáveis, com circulação mais lenta, são águas mais quentes, ortotermiais, pois houve tempo para entrarem em equilíbrio com a temperatura ambiente.

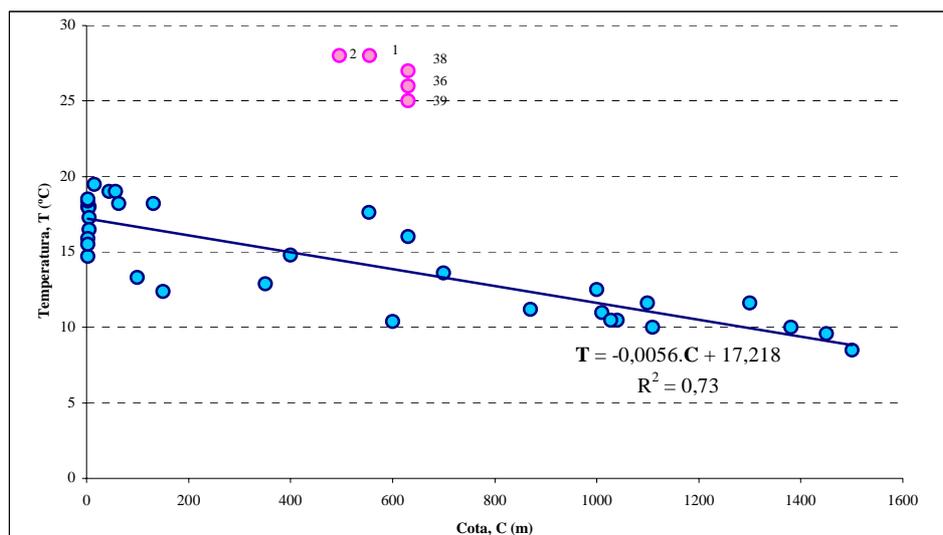


Figura 9 - Representação gráfica da temperatura das águas em função da altitude.

Existe, ainda, um grupo de cinco águas termais, a nº1 do túnel do Pico Grande, a nº2 do túnel da Encumeada, e as nº36, nº38, nº39 da galeria da Fajã da Ama, todas elas emergentes em falhas, no Complexo Antigo, com características muito próprias, bastante distintas das restantes que representam a grande maioria das águas da ilha da Madeira.

A distribuição espacial da condutividade revela um aumento da mineralização das águas com a profundidade e proximidade do mar, reflectindo, essencialmente, a crescente influência dos principais mecanismos mineralizadores das águas, a hidrólise dos minerais silicatados das rochas e a contaminação (directa ou indirecta) por sais de origem marinha.

Caracterizam-se, em geral, por baixas mineralizações, com condutividades que vão desde os 33 até aos 501 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sendo as águas termais, que circulam no Complexo Antigo, bastante mais mineralizadas, com condutividades que vão desde os 594 aos 3300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, razão pela qual, a nº2, a nº38 e a nº39, se consideram mesmo, águas termominerais (Calado, 1993).

Tal como hipótese colocada por Almeida *et al.* (1984), sugere-se a existência de um grupo de águas com dissolução de CO_2 em sistema aberto, ou seja, com entrada de CO_2 de origem profunda, nomeadamente: amostras do túnel do Pico Grande (nº1); do túnel da Encumeada (nº2); do túnel dos Socorridos II (nº3); da galeria da Fajã da Ama (nº36, 37, 38, 39). As amostras nº2, nº38 e nº39 podem ser designadas como gasocarbónicas.

A maioria das águas amostradas possui pH superior a 7, indicando carácter alcalino. Apenas algumas águas das cotas mais altas são agressivas. As alcalinidades das águas não termais são, em geral, baixas, variando as suas médias entre 31,8 e 75,1 mg/l de Ca CO_3 , sendo nas águas termais, muito superior, 813 mg/l Ca CO_3 .

A maior parte das águas são brandas, as águas dos furos são pouco duras, e apenas as águas termais nº2, do túnel da Encumeada, e nº39, da galeria da Fajã da Ama, são classificadas como muito duras.

O sódio é o catião mais importante seguido do cálcio, do magnésio e, por fim, do potássio. O bicarbonato é, na generalidade das águas amostradas, o anião mais importante, seguido do cloreto e do sulfato.

As águas não termais têm concentrações de sílica baixas, com médias da ordem dos 23,7 a 42,9 mg/l. Os mínimos dizem sempre respeito a nascentes suspensas de altitude, onde a extensão da hidrólise é pequena, enquanto os valores mais elevados de sílica correspondem às águas termais, chegando a atingir 120 mg/l.

Quadro 3 – Características dos locais amostrados.

Referência	Localização	Tipo	Cota (m)	Aquífero	Complexo Vulcânico
1	Pico Grande	Túnel	555	Basal	CA
2	Encumeada	Túnel	495	Basal	CA
3	Socorridos II	Túnel	553	Basal	CA
4	Poiso	Nascente	1380	Suspenso	CP
5	Ribeiro Frio	Nascente	1100	Suspenso	CP
6	Homem em Pé	Nascente	1500	Suspenso	CP
7	Pico das Pedras	Nascente	870	Suspenso	CP
8	Cedro Gordo	Nascente	400	Suspenso	CP
9	Pedras	Nascente	1450	Suspenso	CP
10	Rabaças	Galeria	1010	Basal	CP
11	Cascalho	Nascente	1300	Suspenso	CP
12	Risco	Nascente	1040	Suspenso	CP
13	Rabaçal	Galeria	1028	Basal	CP
14	Fonte do Barro	Nascente	1100	Suspenso	CP
15	Madalena do Mar	Túnel	15	Suspenso	CP
16	JK16 (Socorridos)	Furo	3,1	Basal	CP
17	Porto Novo	Galeria	600	Basal	CP
18	João Ferino	Nascente	700	Suspenso	CP
19	Fontes Vermelhas	Galeria	350	Basal	CP
20	JK7 (Machico)	Furo	44,1	Basal	CA
21	JK1 (Socorridos)	Furo	4,9	Basal	CP
22	Eira do Serrado	Nascente	1000	Suspenso	CP
23	Água d' Alto	Nascente	100	Suspenso	CP
24	Véu da Noiva	Nascente	150	Suspenso	CP
25	JK2 (Socorridos)	Furo	3,9	Basal	CP
26	JK3 (Socorridos)	Furo	4,8	Basal	CP
27	JK4 (Socorridos)	Furo	5,2	Basal	CP
28	JK5 (Socorridos)	Furo	2,6	Basal	CP
29	JK8 (Machico)	Furo	131,4	Basal	CA
30	JK10 (Porto Novo)	Furo	2,9	Basal	CP
31	JK9 (Porto Novo)	Furo	2,5	Basal	CP
32	JK12 (Machico)	Furo	57,1	Basal	CA
33	JK13 (Machico)	Furo	62,4	Basal	CA
34	JK15 (Santa Cruz)	Furo	1,9	Basal	CP
35	JK23 (Caniço)	Furo	2,8	Basal	CP
36	Fajã da Ama	Galeria	630	Basal	CA
37	Fajã da Ama	Galeria	630	Basal	CA
38	Fajã da Ama	Galeria	630	Basal	CA
39	Fajã da Ama	Galeria	630	Basal	CA

Consideram-se, assim, três grupos de águas, consoante os processos evolutivos predominantes:

- o primeiro, o das águas termais, cujo principal processo mineralizador é a hidrólise dos silicatos, devido à presença abundante de CO₂ de origem profunda e à temperatura, não sendo de excluir, ainda, a contribuição de H₂S e cloretos, também, de origem profunda;

- o segundo, que evolui por hidrólise, por contaminação agrícola e por contaminação de sais de origem marinha, quer seja directamente, por mistura com água do mar, quer indirectamente, através de aerossóis marinhos presentes na atmosfera, como é o caso dos furos situados próximo do mar, das nascentes suspensas de altitude e das nascentes do litoral norte da ilha;
- e o terceiro grupo, o das restantes, que evolui apenas por hidrólise.

A observação do mapa de diagramas de Stiff (Figura 10) permite evidenciar alguns aspectos essenciais:

1º - Aumento de mineralização das águas com a profundidade e proximidade do mar, materializado pelo aumento da dimensão dos diagramas, sugerindo a existência de um fluxo de águas subterrâneas do centro para a periferia da ilha.

2º - Aumento brusco da mineralização nas águas nº1, túnel do Pico Grande, nº2, túnel da Encumeada, nº37 e nº39 da galeria da Fajã da Ama, possuidoras de CO₂ de origem profunda. São todas de fácies bicarbonatada, sódica no caso da nº1, cálcica a nº2, e magnesianas as nº37 e nº39.

3º - Predomínio das fácies cloretadas nas nascentes de altitude, contaminadas pelas chuvas e nevoeiros, ricos em iões cloreto; nos furos mais próximos do mar, provavelmente por efeito da contaminação marinha; e, ainda, nas nascentes do litoral norte, pela presença de aerossóis.

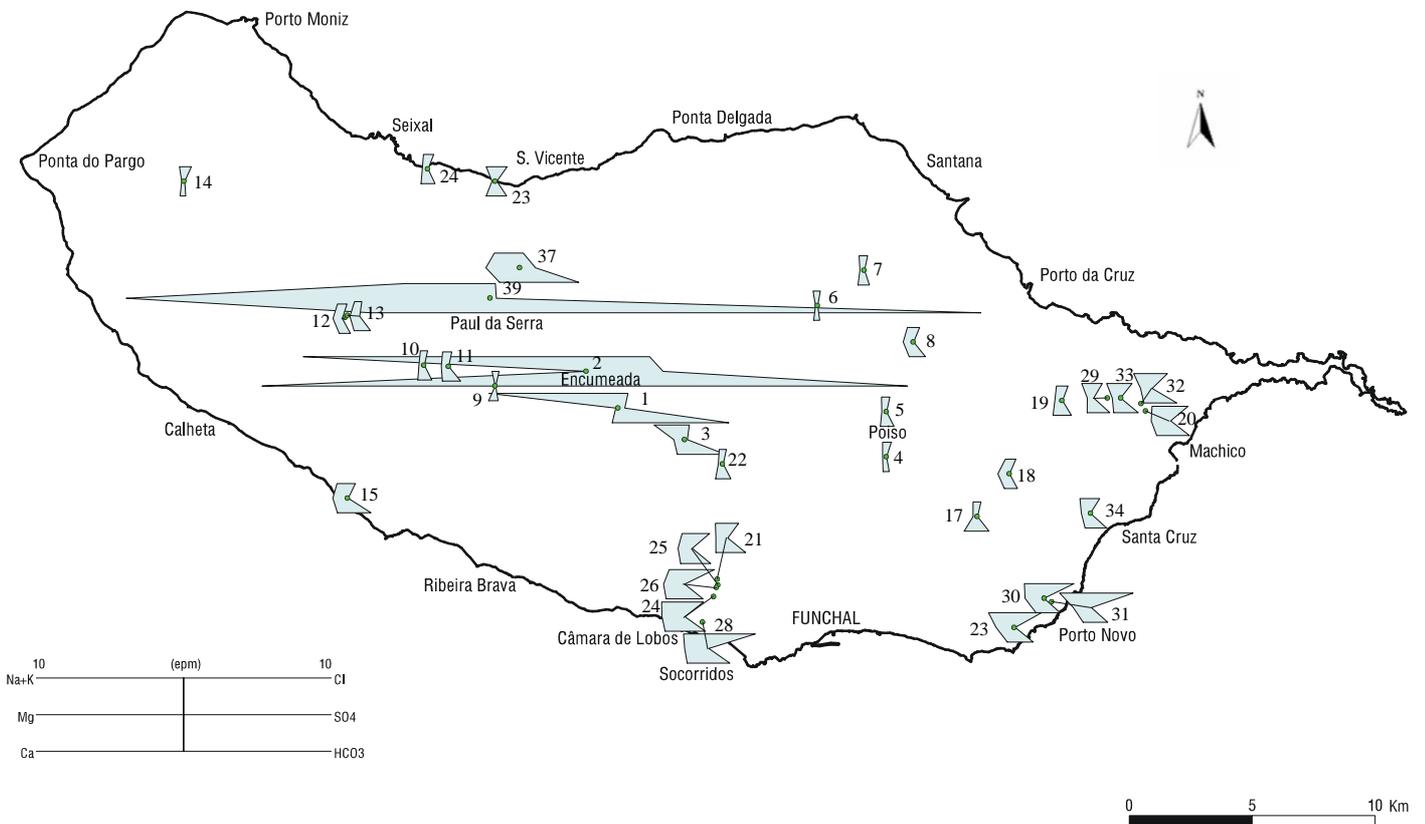


Figura 10 – Diagramas de Stiff.

Quanto à qualidade da água para consumo humano, verifica-se que a grande maioria das águas subterrâneas amostradas são, em relação aos elementos maiores, de boa qualidade para consumo humano.

Os amarelos observados ocorrem em relação com os teores em cloreto e sódio, apenas em certas épocas do ano, nos furos situados mais próximo do mar, nas ribeiras dos Socorridos (41 a 113 mg/L), do Porto Novo (72 a 100 mg/L), de Machico (27 a 45 mg/L) e do Caniço (66 mg/L).

Existem, ainda, alguns valores pontuais, situados acima dos máximos recomendados: para os nitratos, nos furos JK4 e JK16 dos Socorridos, causados, por contaminação agrícola; para o cloreto, na nascente da Água d'Alto, causada pelos aerossóis marinhos, provenientes da costa norte da ilha; para o sódio no túnel dos Socorridos II, resultante de forte lixiviação da rocha, causada pela presença de CO₂, com grande extracção de sódio; e finalmente, para o sódio e o sulfato, na amostra nº 37 da galeria da Fajã da Ama, na qual o processo de lixiviação da rocha parece também ser intenso, e onde poderá ocorrer oxidação de sulfuretos, ou ainda, ascensão de H₂S profundo, pela falha que funciona como conduta hidrogeológica, drenando o Complexo Principal do Paul da Serra.

Disponibilidades Hídricas Subterrâneas

A avaliação das disponibilidades hídricas subterrâneas foi efectuada a partir da aplicação do modelo de Escoamento/Recarga de AZEVEDO *et al.* (2002) que estima as componentes infiltração e escoamento em ilhas vulcânicas a partir dos valores de superavit hídrico. Esta metodologia foi aplicada, com sucesso, no arquipélago dos Açores que é formado por um conjunto de ilhas vulcânicas, algumas das quais, com muitas semelhanças com a ilha da Madeira (CRUZ, 2001). Da aplicação deste modelo à ilha da Madeira obtém-se uma recarga anual média de 363 mm.

Dado que se estimaram as seguintes descargas subterrâneas anuais médias:

1. extracções directas a partir de túneis, galerias e furos: 94 mm;
2. descarga de nascentes não incluídas nas levadas, captadas directamente para o abastecimento, PARADELA (1980): 15 mm;
3. escoamento subterrâneo e hipodérmico estimado para a rede hidrográfica: 202 mm;
4. e ainda, existência de uma parcela de escoamento subterrâneo não contabilizada nas estações hidrométricas, pois o escoamento observado na foz das ribeiras durante o verão é, claramente, superior à diferença entre o escoamento subterrâneo e hipodérmico estimado menos o captado e transportado pelas levadas (202 – 141 = 61 mm); considerando, assim, que o escoamento subterrâneo e hipodérmico estimado possa estar subavaliado e que por hipótese corresponda apenas a 90% do real, então a parcela em questão

será de $225 - 202 = 23 \text{ mm}$, valor que se aproxima do caudal médio encontrado nas ribeiras ($61+23=84$ mm), assim disponibilidades hídricas subterrâneas serão:

$$363 - 94 - 15 - 202 - 23 = 29 \text{ mm}$$

O montante disponível, de 29 mm, calculado a partir da recarga proveniente da precipitação anual média, afigura-se claramente baixo, não sendo coerente com as condições e características hidrodinâmicas e hidroquímicas observadas no aquífero de base da ilha da Madeira. O facto, ainda, de a avaliação do balanço hídrico do Paul da Serra, PRADA (2000), mostrar que a recarga obtida apenas a partir da chuva não é suficiente para satisfazer a descarga subterrânea daquele maciço, assim como os elevados valores de precipitação proveniente dos nevoeiros obtidos sob uma *Erica arborea* L. na Bica da Cana, PRADA & SILVA (2001), leva a assumir que a recarga na ilha da Madeira é complementada por uma importante parcela de água proveniente dos nevoeiros sob a forma de precipitação oculta.

CONCLUSÕES

A Madeira é um exemplo de magmatismo oceânico intraplaca, consensualmente considerada um “hot-spot” (ponto quente) cuja actividade teve início antes do Miocénico superior, há mais de 5,2 Ma, tendo-se prolongado até há 6 000/ 7 000 anos BP. Os trabalhos de campo mais recentes permitiram definir sete unidades geológicas principais. Durante a abertura recente dos túneis da Encumeada (rodoviário e hidráulico) e da galeria da Fajã da Ama foram encontradas, associadas a falhas, saídas de águas termais contendo teores elevados de CO_2 livre. A persistência dos gases parece indicar não se tratar de gases acumulados nas rochas, mas sim de manifestações secundárias de vulcanismo.

Apesar de insuficiente para explicar a totalidade da variabilidade espacial da precipitação, a altitude é o primeiro parâmetro a considerar, tendo-se constatado que a variação da precipitação com a altitude não era linear e que dependia da orientação das vertentes, sendo as seguintes relações quadráticas as que melhor se adaptam aos dados:

$$\text{Ilha da Madeira: } P = -0,0005 h^2 + 2,14 h + 543,33 \quad \text{com } r = 0,89$$

$$\text{Vertente norte: } P = -0,0005 h^2 + 1,98 h + 868,09 \quad \text{com } r = 0,89$$

$$\text{Vertente sul: } P = -0,0006 h^2 + 2,01 h + 487,42 \quad \text{com } r = 0,90$$

Propõe-se a decomposição do escoamento que ocorre em cada secção da rede hidrográfica em duas parcelas: uma que aflui à rede hidrográfica em consequência directa da precipitação ocorrida sobre a bacia hidrográfica e que se

desloca à superfície do terreno; outra proveniente das reservas subterrâneas e do escoamento hipodérmico contribuindo também para o escoamento observado naquela secção.

A partir dos ensaios de bombeamento realizados nos furos de captação, que permitiram conhecer o domínio litoral da ilha, dos registos dos caudais das galerias e nascentes, que possibilitaram analisar o hidrodinamismo do domínio de altitude e dos dados hidroquímicos obtidos, elaborou-se o seguinte modelo hidrogeológico para a ilha da Madeira:

1- Existência de aquíferos suspensos em altitude, relacionados com níveis impermeáveis, do tipo tufos, escoadas argilificadas, níveis de cozimento em paleossolos ou basaltos alterados e depósitos freatomagmáticos, caracterizados por águas mais frias, pouco mineralizadas, com pH ácidos e fácies frequentemente cloretadas. São muito vulneráveis às variações do clima, variando os seus caudais ao longo do ano hidrológico, consoante a recarga, chegando mesmo, alguns deles, a esgotar.

2 – Existência de um nível de saturação regional ou aquífero de base. Este aquífero possui características distintas, consoante a formação vulcânica. Assim, em materiais do Complexo Principal, o aquífero caracteriza-se por fortes transmissividades, gradientes piezométricos baixos e águas medianamente mineralizadas. Por outro lado, em formações do Complexo Antigo, na maioria, muito alteradas, onde se encontram basaltos já argilificados e piroclastos transformados em tufos, o aquífero caracteriza-se por transmissividades mais baixas, águas mais mineralizadas e gradientes piezométricos mais elevados.

3 – Existência de aquíferos compartimentados. Em virtude do vulcanismo na Madeira ser essencialmente do tipo fissural, todo o edifício vulcânico está intensamente cortado por filões subverticais que compartimentam o aquífero de base. Daí resulta que o nível de saturação geral da ilha não seja uma linha contínua, mas, sim, quebrada pelos filões, com variações bruscas de potencial entre alguns compartimentos contíguos.

A maior parte das águas são águas frias, existindo um grupo de cinco águas termais emergentes em falhas, no Complexo Antigo, com características muito próprias, bastante distintas das restantes.

A distribuição espacial da condutividade revela um aumento da mineralização das águas com a profundidade e proximidade do mar, reflectindo, a crescente influência dos principais mecanismos mineralizadores das águas, a hidrólise dos minerais silicatados das rochas e a contaminação por sais de origem marinha. Caracterizam-se, em geral, por baixas mineralizações, com condutividades eléctricas que vão desde os 33 até aos 501 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sendo as águas termais bastante mais mineralizadas, com condutividades eléctricas que vão desde os 594 aos 3300 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Quanto à qualidade da água para consumo humano, verifica-se que a generalidade das águas subterrâneas amostradas são, em relação aos elementos maiores, de boa qualidade para consumo humano (dentro do VMR).

A avaliação das disponibilidades hídricas subterrâneas mostra claramente que a recarga se encontra subavaliada dado não ter sido considerada a contribuição da precipitação oculta. A parcela de recarga proveniente da chuva não é suficiente para manter as condições de equilíbrio entre a recarga e a descarga observadas no aquífero de base, sendo a recarga complementada por água proveniente dos nevoeiros e retida pela vegetação. Pela sua importância, sugere-se que sejam dedicados à precipitação oculta estudos mais aprofundados com vista à sua integração num futuro balanço hídrico permitindo assim avaliar com maior rigor as reservas hídricas da ilha da Madeira.

BIBLIOGRAFIA

- Almeida, C.; Romariz, C., Silva, M.O. (1984) Hidroquímica da ilha da Madeira. *Recursos Hídricos*, 5(13) 33-42.
- Azevedo E., Rodrigues, A., Diogo P., Rodrigues M. (2002) Infiltração e escoamento em pequenas ilhas vulcânicas. Aproximação genérica à quantificação da infiltração e do escoamento nas ilhas dos Açores. VI Congresso da Água. Porto 2002.
- Calado, C. (1993) Águas Minerais e Águas Termais. Conceitos e Classificação. In: *XIII Curso de Actualização de Geociências (APG/SPM): 11pp.*
- Cruz, J.V. (2001) Recursos Subterrâneos. Plano Regional da Água da Região Autónoma dos Açores. Relatório Técnico-Científico 03/DGUA/01, Centro de Geologia Ambiental, DG/UA, Ponta Delgada, 453 p.
- Ferreira A. (1955) O clima de Portugal. Açores e Madeira, INMG, Fasc VIII, 64pp.
- Ferreira M., Macedo, C. & Ferreira, J. (1988) K-Ar geochronology in the Selvagens, Porto Santo and Madeira islands (Eastern Central Atlantic): A 30 m.y. spectrum of submarine and subaerial volcanism.
- Fonseca P., Madeira J., Serralheiro A., Rodrigues C., Prada S. & Nogueira C. (2000) Dados geológicos preliminares sobre os alinhamentos tectónicos da ilha da Madeira. Actas das Comunicações apresentadas à 2ª Assembleia Luso Espanhola de Geodesia e Geofísica, Lagos, Fevereiro de 2000.
- Gaspar M. A. (2001), Contribuição para a caracterização dos recursos hídricos na ilha da Madeira, Projecto Final de Curso, IST. Lisboa.
- Gaspar M. A. e Portela, M. M. (2002), “Contribuição para a caracterização dos recursos hídricos na ilha da Madeira. Modelos para avaliação do escoamento superficial”. 6º Congresso da Água, Porto, 2002.
- Geldmacher J, P van den Bogaard, Hoernle, Schmincke (2000) Ar age dating of the Madeira Archipelago and hotspot track (eastern North Atlantic). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 1, paper number 1999GC000018, February 2000.
- Mata J., (1996) Petrologia e Geoquímica das lavas da ilha da Madeira: implicações para os modelos de evolução mantélica. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Geologia, Lisbon University, 471 pp.
- Paradela P. (1980) Hidrogeologia Geral das Ilhas Adjacentes. Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal, Tomo 66, 241-256.
- Portela M. M., Gaspar M. A. e Hora, G. R. (2002) Avaliação do escoamento anual médio na ilha da Madeira, *Tecnologia da Água*, Edição II, 50-58.
- Prada S (2000) Geologia e Recursos Hídricos Subterrâneos da Ilha da Madeira. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Geologia. Universidade da Madeira: 351 pp.

- Prada S & Serralheiro A (2000) Stratigraphy and Evolutionary Model of Madeira Island. *Bocagiana* 200: 13 pp. Museu Municipal Funchal (Madeira).
- Prada S & Silva M (2001) Fog Precipitation on the Island of Madeira (Portugal). *Environmental Geology* 41 (3-4), 384 - 389.
- Prada S, Silva MO, Cruz JV (2003) Groundwater behaviour in Madeira, volcanic island (Portugal). *Hidrogeology Journal* (submetido)
- Ribeiro O. (1985) A ilha da Madeira até meados do século XX. Instituto da Cultura e Língua Portuguesa. Lisboa 138pp.
- Rodrigues R. (1995) Hidrologia de Ilhas Vulcânicas, LNEC, Lisboa.
- Schminke H.-U. (1982) Volcanic and chemical evolution of the Canary islands. In: *Rad, U.Von et al. eds: Geology of the northwest african continental margin: 273-305. Springer-Verlag.*