

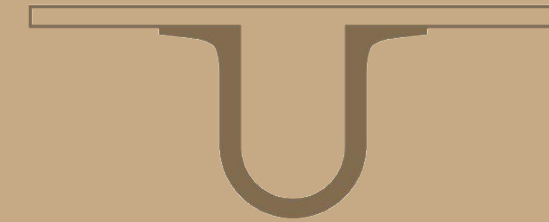
Paulo Filipe Silva Borges

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS
O CASO DE ESTUDO DA ILHA GRACIOSA (AÇORES)

UNIVERSIDADE D
COIMBRA



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Paulo Filipe Silva Borges

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS
O CASO DE ESTUDO DA ILHA GRACIOSA (AÇORES)

Dissertação no âmbito do Mestrado em Geociências: Ramo de Ambiente e Ordenamento orientada pelo Professor José Manuel Martins de Azevedo e Professor Francisco Cota Rodrigues e apresentada ao Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologias

julho de 2019



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Paulo Filipe Silva Borges

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS
O CASO DE ESTUDO DA ILHA GRACIOSA (AÇORES)

Dissertação no âmbito do Mestrado em Geociências: Ramo de Ambiente e Ordenamento orientada pelo Professor Doutor José Manuel Martins de Azevedo e pelo Professor Doutor Francisco Cota Rodrigues e apresentada ao Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologias.

julho de 2019

Resumo

Nesta dissertação efetua-se o estudo hidrogeológico da ilha Graciosa, situada no setor mais setentrional do Grupo Central do Arquipélago dos Açores. Uma ilha de pequenas dimensões que historicamente sempre viveu com problemas de armazenamento e abastecimento de água.

A ilha em estudo é constituída quase exclusivamente por rochas e depósitos vulcânicos que se organizam em três Complexos. A precipitação média anual é de 918,4mm sendo a menor entre as 9 ilhas dos Açores.

O presente estudo baseou-se fundamentalmente: (1) na recolha de elementos bibliográficos; (2) na realização de trabalho de campo de reconhecimento e inventariação de pontos de água, sendo realizadas medições *in situ* de parâmetros físico-químicos (condutividade elétrica e temperatura) e colheram-se amostras de água, a partir das quais se determinou a concentração de cloretos em laboratório; (3) na interpretação de dados e construção de perfis e modelos hidrogeológicos.

Com base nos dados de campo e nos elementos bibliográficos, nomeadamente nas Cartas geológicas e Vulcano-estratigráficas, alcançaram-se os seguintes resultados de natureza hidrogeológica: (1) o edifício insular poderá ser dividido em 2 Domínios hidrogeológicos; (2) a recarga aquífera efetua-se por infiltração e infiltração profunda, ocorrendo fundamentalmente nas zonas de maior relevo; (3) ocorrem vários aquíferos suspensos; contudo as maiores massas de água subterrânea são os aquíferos basais; (4) a descarga faz-se de forma natural pelas nascentes e de forma induzida pelos poços e furos; (5) os resultados das análises de condutividade elétrica e concentração em Cloretos apontam para a ocorrência de intrusão salina nos aquíferos basais.

Apresenta-se um modelo hidrogeológico conceptual que evidencia a ocorrência, circulação e armazenamento das massas de água subterrânea na ilha Graciosa.

Palavras-chave: Ilha Graciosa; Hidrogeologia; Domínios hidrogeológicos; Modelo Hidrogeológico conceptual.

Abstract

This dissertation shows the hydrogeological study of Graciosa Island, located on the northern sector of the Central Group of Azores Archipelago. Historically, this small island had always water supply and storage problems.

Almost exclusively volcanic bedrock and eruption's deposits, organized in three areas, constitute the studied island. The annual average precipitation is 918,4mm, the lowest among the nine islands of the Azores.

This study was based fundamentally on: (1) bibliographical research; (2) field work of surveying and inventory of water sources, with physical and chemical (electrical conductivity and temperature) measurements done *in situ*, as well as water samples that determined chloride levels, in laboratory; (3) data interpretation and construction of hydrogeological conceptual model.

Based on the field and bibliographical data, mainly the geological and vulcanostratigraphic charts, the following natural hydrogeological results were reached: (1) the Island is divided in two distinct hydrogeological domains; (2) the aquifer's refill is done by infiltration and deep infiltration, occurring mainly in areas that are more mountainous; (3) there are several perched aquifers, however, the largest areas of underground waters are basal aquifers; (4) the discharge is done naturally through springs and humanly induced through wells and drills; (5) the electrical conductivity and chloride analysis results show the intrusion of seawater in the basal aquifers.

Presents an hydrogeological conceptual model that shows the occurrence, circulation and storage of Groundwater in Graciosa Island.

Keywords: Graciosa island; Hydrogeology; hydrogeological domains; hydrogeological conceptual model.

Agradecimentos

Este projeto não seria possível sem a preciosa orientação do Professor Doutor José Manuel M. Azevedo pelos conselhos e sugestões fornecidas no âmbito desta dissertação, confiando, logo à partida, no convite que lhe foi solicitado.

De seguida, mas não menos importante, um caloroso e reconhecido agradecimento ao Professor Doutor Francisco Cota Rodrigues (Universidade dos Açores) por ter aceitado o convite para co-orientar o mesmo projeto; pela paciência, graciosidade e empenho pessoal em levar em consideração todo o esforço desde o princípio até ao final da grande missão.

Cordiais agradecimentos ao Departamento de Ciências da Terra, da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, pelo ensinamento na área de Geociências. Um obrigado especial por terem aceitado a dissertação e o tema proposto a desenvolver.

Um valoroso agradecimento à Universidade dos Açores - Campus de Angra do Heroísmo pela disponibilização da coorientação de um dos seus docentes anteriormente referenciado.

Ao Instituto de Investigação e Tecnologia Agrárias e do Ambiente (IITAA), um agradecimento pelo espaço de trabalho disponibilizado nas instalações académicas, bem como a disponibilização da utilização do Laboratório e outros apoios técnicos prementes para a área estudada.

É de referenciar beneficentemente a prestação auxiliar do Exm^o Presidente da Câmara Municipal de Santa Cruz da Graciosa, Dr. Manuel Avelar Cunha Santos, pelo financiamento, embora indiretamente, do alojamento, transporte e Pessoal Técnico.

Ao Pessoal Técnico os mais sinceros agradecimentos: à Engenheira Lurdes Faustino pela receção na ilha Graciosa e a transmissão de informações técnicas essenciais ao desenvolvimento do estudo; e ao técnico e amigo João Ferraz pelo apoio e acompanhamento nos trabalhos de campo.

À D. Lurdes Martins, Técnica Superior do Laboratório de Química Analítica, também um simpático agradecimento pela transmissão de conhecimentos e técnicas no desenvolvimento das análises laboratoriais deste estudo.

Obrigado à amizade dos colegas de curso que acompanharam os últimos períodos universitários, com desejos de boa sorte no seu percurso profissional nas respetivas áreas.

Obrigado à família e amigos que estiveram sempre próximos da evolução da dissertação.

Ao saudoso professor e amigo Márcio Marcos um obrigado pelo encaminhamento inicial no estudo das Geociências e por não se desligar desta fase de estudos.

À Juliana Vieira Fonte aquele obrigado especial.

Referências de Financiamento

Parte deste trabalho foi financiado pelo Governo Regional dos Açores através do IROA (Instituto Regional de Ordenamento Agrário) que patrocinou o projeto GRAJORGE - Avaliação de Recursos Hídricos nas ilhas de S. Jorge e Graciosa - a decorrer no Instituto Investigação Tecnológica Agrária da Universidade dos Açores (IITA-UAç).

Embora indiretamente, os trabalhos de campo foram também financiados pela Câmara Municipal de Santa Cruz da Graciosa que facultou o alojamento, transporte e pessoal técnico para auxílio no desenvolvimento dos trabalhos de campo na ilha Graciosa.

Índice

| | |
|-----------------------------------------------------|------------|
| Índice de Tabelas | I |
| Índice de Figuras | III |
| Lista de Abreviaturas | VII |
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1. Resenha Bibliográfica | 2 |
| 1.2. Objetivos | 3 |
| 1.3. Metodologias | 4 |
| 1.4. Fluxograma | 8 |
| 2. Enquadramento Geral | 9 |
| 2.1. Enquadramento Geográfico | 9 |
| 2.2. Enquadramento Administrativo | 10 |
| 2.3. Enquadramento Hidroclimatológico | 11 |
| 2.3.1. Precipitação Atmosférica..... | 12 |
| 2.3.2. Humidade Atmosférica..... | 12 |
| 2.3.3. Temperatura Atmosférica..... | 12 |
| 2.3.4. Vento..... | 13 |
| 2.4. Caracterização Hidrográfica | 13 |
| 2.5. Enquadramento Geológico Regional | 15 |
| 2.5.1. Enquadramento Geomorfológico..... | 15 |
| 2.5.2. Enquadramento Estrutural..... | 16 |
| 2.5.2.1. Crista Média Atlântica (CMA)..... | 16 |
| 2.5.2.2. Zonas de Fraturas dos Açores..... | 17 |
| 2.5.2.3. Rifte da Terceira..... | 17 |
| 2.5.2.4. Enquadramento Sísmico-Vulcânico..... | 18 |
| 2.5.3. Geologia e Geocronologia Insulares..... | 20 |
| 3. Caracterização Física Insular | 22 |
| 3.1. Caracterização Morfológica | 22 |
| 3.2. Caracterização Hidroclimatológica | 24 |
| 3.2.1. Precipitação e Temperatura Atmosférica..... | 24 |
| 3.2.2. Balanço Hídrico..... | 27 |
| 3.3. Caracterização Hidrográfica | 30 |
| 3.4. Caracterização Tectónica | 31 |
| 3.5. Caracterização Geológica | 32 |
| 3.5.1. Complexo Vulcânico da Serra das Fontes..... | 33 |
| 3.5.2. Complexo Vulcânico da Serra Branca..... | 34 |

| | | |
|-------------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.5.3. | Complexo Vulcânico de Vitória..... | 34 |
| 3.5.3.1. | Unidade do Vulcão Central..... | 34 |
| 3.5.3.2. | Unidade de Vitória..... | 36 |
| 3.5.4. | Depósitos de Vertente..... | 36 |
| 3.5.5. | Paleossolos..... | 36 |
| 3.6. | Caracterização Sísmico-Vulcânica..... | 42 |
| 3.7. | Uso e Ocupação do Solo..... | 43 |
| 4. | <i>Hidrogeologia da Ilha Graciosa</i>..... | 45 |
| 4.1. | Pontos de Água Estudados..... | 46 |
| 4.1.1. | Nascentes..... | 46 |
| 4.1.2. | Poços..... | 51 |
| 4.1.3. | Furos..... | 54 |
| 4.2. | Resultados..... | 57 |
| 4.2.1. | Nascentes..... | 58 |
| 4.2.2. | Poços..... | 60 |
| 4.2.3. | Furos..... | 63 |
| 4.3. | Tratamento e Interpretação de Resultados..... | 66 |
| 4.3.1. | Piezometria..... | 66 |
| 4.3.1.1. | Poços..... | 66 |
| 4.3.1.2. | Furos..... | 66 |
| 4.3.2. | Caudais de Nascentes..... | 67 |
| 4.3.3. | Temperatura da Água..... | 68 |
| 4.3.3.1. | Nascentes..... | 68 |
| 4.3.3.2. | Poços..... | 68 |
| 4.3.3.3. | Furos..... | 68 |
| 4.3.4. | Condutividade Elétrica (CE)..... | 69 |
| 4.3.4.1. | Nascentes..... | 69 |
| 4.3.4.2. | Poços..... | 69 |
| 4.3.4.3. | Furos..... | 70 |
| 4.3.5. | pH..... | 70 |
| 4.3.6. | Cloretos e Intrusão Salina..... | 71 |
| 4.3.6.1. | Nascentes..... | 71 |
| 4.3.6.2. | Poços..... | 72 |
| 4.3.6.3. | Furos..... | 73 |
| 4.3.6.4. | Intrusão Salina..... | 73 |
| 4.4. | Caracterização Hidrogeológica do Meio Vulcânico..... | 75 |
| 4.4.1. | Caracterização Hidrogeológica das Formações Vulcânicas..... | 76 |

| | | |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.4.1.1. | Escoadas Lávicas..... | 76 |
| 4.4.1.2. | Depósitos Piroclásticos..... | 77 |
| 4.4.1.3. | Depósitos Vulcano-Sedimentares..... | 78 |
| 4.4.1.4. | Paleossolos | 78 |
| 4.4.2. | Caracterização Hidrogeológica das Estruturas Vulcânicas..... | 79 |
| 4.4.2.1. | Chaminés e Crateras Vulcânicas..... | 79 |
| 4.4.2.2. | Filões e Outros Corpos Intrusivos..... | 79 |
| 4.4.2.3. | Falhas..... | 80 |
| 4.4.3. | Caracterização Hidrogeológica das Formações da ilha Graciosa..... | 80 |
| 4.4.3.1. | Complexo Vulcânico da Serra das Fontes | 80 |
| 4.4.3.2. | Complexo Vulcânico da Serra Branca | 81 |
| 4.4.3.3. | Complexo Vulcânico de Vitória | 81 |
| 4.4.3.3.1. | Unidade do Vulcão Central..... | 81 |
| 4.4.3.3.2. | Unidade de Vitória | 82 |
| 4.4.3.4. | Paleossolos | 82 |
| 4.4.3.5. | Depósitos vulcanoclásticos de vertente | 82 |
| 4.5. | Domínios Hidrogeológicos Insulares..... | 85 |
| 4.5.1. | Domínio Hidrogeológico I..... | 86 |
| 4.5.1.1. | Subdomínio Hidrogeológico I-1..... | 86 |
| 4.5.1.2. | Subdomínio Hidrogeológico I-2..... | 86 |
| 4.5.2. | Domínio Hidrogeológico II..... | 87 |
| 4.5.2.1. | Subdomínio Hidrogeológico II-1..... | 87 |
| 4.5.2.2. | Subdomínio Hidrogeológico II-2..... | 88 |
| 5. | Modelo Hidrogeológico Conceptual da Ilha Graciosa..... | 89 |
| 5.1. | Modelo Hidrogeológico Conceptual..... | 89 |
| 5.1.1. | Recarga Aquífera..... | 90 |
| 5.1.2. | Hidrodinâmica Subterrânea..... | 91 |
| 5.1.2.1. | Domínio hidrogeológico I..... | 91 |
| 5.1.2.2. | Domínio hidrogeológico II | 92 |
| 5.1.3. | Descarga Aquífera | 92 |
| 5.2. | Conclusões | 93 |
| 5.3. | Recomendações | 94 |
| Bibliografia | 99 | |
| Anexo I..... | I | |
| Anexo II..... | VII | |

Índice de Tabelas

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 3.1: Valores médios de precipitação (mm) medidos no posto udométrico (Latitude 38°05' N, Longitude 28°00' W; altitude de 30 m) referentes ao período 1935 a 1960..... | 24 |
| Tabela 3.2: Valores médios de precipitação (Prec.) e temperatura (Tmédia) disponíveis em Climate-Data.org (localização na figura 3.2) referentes ao período de 1982 a 2012. | 26 |
| Tabela 3.3: Valores da evapotranspiração potencial (ETP) para ilha da Graciosa, determinados pelo método de Thornthwaite.. | 28 |
| Tabela 3.4: Resultados do balanço hídrico sequencial mensal para a ilha da Graciosa, determinados pelo método de Thornthwaite.. | 28 |
| Tabela 4.1: Inventário (latitude; longitude e altitude) de pontos de água: Nascentes..... | 48 |
| Tabela 4.2: Inventário (latitude; longitude e altitude) de pontos de água: Poços. | 52 |
| Tabela 4.3: Inventário (latitude; longitude e altitude) de pontos de água: Furos. | 56 |
| Tabela 4.4: Resultados das medições efetuadas nas nascentes N1, N2, N3, N6, N7 e N9. | 58 |
| Tabela 4.5: Análise estatística dos parâmetros físico-químicos e da concentração de Cloretos nas nascentes da ilha Graciosa. | 59 |
| Tabela 4.6: Valores médios mensais de caudais (Q=L/min) medidos nas diversas nascentes da ilha Graciosa, entre 2015 a 2018. | 59 |
| Tabela 4.7: Resultados das medições efetuadas nos poços P1, P2 e P3..... | 61 |
| Tabela 4.8: Valores médios mensais das Temperaturas (T) registadas no poço P3, correspondentes a 168 medições, efetuadas entre agosto de 1994 e fevereiro de 1995. | 61 |
| Tabela 4.9: Valores mensais da precipitação (Prec.) (mm) e valores médios mensais das cotas piezométricas (m) dos poços P1, P2 e P3, correspondentes a 293 medições, efetuadas entre março de 1993 e junho de 1994. | 61 |
| Tabela 4.10: Dados dos diversos furos da ilha Graciosa. | 63 |
| Tabela 4.11: Resultados das medições efetuadas em diversos furos na ilha Graciosa. | 64 |
| Tabela 4.12: Análise estatística dos parâmetros físico-químicos e da concentração de Cloretos nos furos da ilha Graciosa. | 65 |
| Tabela 4.13: Caracterização e classificação hidrogeológicas das Formações vulcânicas da ilha Graciosa. | 84 |

Índice de Figuras

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1: Vista do bordo NW da Caldeira a partir do Maciço Centro-Meridional. | 2 |
| Figura 1.2: Ensaaios e medições de campo. | 5 |
| Figura 1.3: Resultados de algumas titulações com AgNO ₃ | 6 |
| Figura 1.4: Póster apresentado no evento WIPday realizado pelo Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, no dia 30 de abril de 2019. | 7 |
| Figura 1.5: Fluxograma das atividades e processos metodológicos. | 8 |
| Figura 2.1: Enquadramento geográfico do Arquipélago dos Açores e da ilha Graciosa. | 10 |
| Figura 2.2: Carta tectónica do Arquipélago dos Açores com os limites batimétricos da Plataforma dos Açores. | 16 |
| Figura 2.3: Carta batimétrica detalhada da região central e ocidental da Plataforma dos Açores. | 18 |
| Figura 3.1: Modelo Digital de Terreno da ilha Graciosa. | 22 |
| Figura 3.2: Localização dos pontos de recolha de dados climáticos pela Climate-Data, no período de 1982 a 2012. | 25 |
| Figura 3.3: Gráfico dos valores médios de precipitação (mm) e temperatura (°C) dos postos udométricos da ilha Graciosa, no período de 1982 a 2012. | 26 |
| Figura 3.4 Gráfico com os resultados do balanço hídrico sequencial mensal para a ilha da Graciosa, determinados pelo método de Thornthwaite. | 29 |
| Figura 3.5: Gráfico com os resultados do balanço hídrico sequencial mensal para ilha da Graciosa, determinados pelo método de Thornthwaite com a correção na evapotranspiração real (ETR). | 29 |
| Figura 3.6: Rede hidrográfica da ilha Graciosa. | 30 |
| Figura 3.7: Carta morfo-tectónica da ilha Graciosa. | 32 |
| Figura 3.8: Carta Geológica Simplificada da ilha Graciosa. | 33 |
| Figura 3.9: Rocha de natureza basáltica (s.l.) do complexo da Serra das Fontes, apresenta elevada compacidade e elevada alteração superficial. | 37 |
| Figura 3.10: Brechas constituídas por depósitos de pedra-pomes ricos em fragmentos densos de natureza traquítica (s.l.). | 37 |
| Figura 3.11: Materiais vulcanoclásticos de natureza basáltica (s.l.) que formam tufos amarelo-acastanhados, palagonitizados. | 38 |
| Figura 3.12: Depósitos hidromagmáticos, apresentando alternância de depósitos de cinzas (3.) com níveis de lapilli (2.), normalmente densos, e com alguns líticos (1.). Alguns dos níveis encontram-se parcialmente palagonitizados (4.). | 38 |
| Figura 3.13: Intercalações de depósitos piroclastos subaéreos, nomeadamente lapilli com textura escoriácea, uns de natureza basáltica (s.l.) (A.) e outros traquítica (s.l.) (B.). | |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Entre estes depósitos há evidências de acumulações de materiais vulcanoclásticos indiferenciados (C. - Bomba vulcânica e D.). | 39 |
| Figura 3.14: Afloramento que evidencia a intercalação de escoadas piroclásticas. | 39 |
| Figura 3.15: Tubos lávicos, de grandes dimensões, nas vertentes da Caldeira. | 40 |
| Figura 3.16: Depósitos piroclásticos que ocorrem sob a forma de cones vulcânicos, dispersos na Plataforma NW. | 40 |
| Figura 3.17: Afloramento do estrato de paleossolo no extremo SE da ilha Graciosa. | 41 |
| Figura 3.18: Tabela Cronoestratigráfica do vulcanismo da ilha Graciosa. Os Círculos e estrela representam a datação $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ do estudo de Larrea (2014), os quadrados representam as datações K/Ar do estudo de Feraud et al. (1980). | 41 |
| Figura 3.19: Carta Vulcano-estratigráfica com os elementos tectónicos. | 42 |
| Figura 3.20: Ocupação dos solos da ilha Graciosa na sua área aflorante, em percentagem. | 43 |
| Figura 3.21: Carta de uso e ocupação dos solos na ilha Graciosa | 44 |
| Figura 4.1: Distribuição geográfica dos pontos de água inventariados na ilha Graciosa. 17 Furos, 23 Nascentes e 6 poços. | 46 |
| Figura 4.2: Distribuição geográfica das 23 nascentes inventariadas na ilha Graciosa. | 47 |
| Figura 4.3: Captação da Nascente N9. | 49 |
| Figura 4.4: Vista da Serra Branca para as nascentes associadas a este cone vulcânico. | 50 |
| Figura 4.5: Piscinas de água quente do Carapacho, onde descarrega a nascente termal N1. | 50 |
| Figura 4.6: Captação por telhas da nascente N14. | 51 |
| Figura 4.7: Distribuição geográfica dos 6 poços inventariados na ilha Graciosa. | 52 |
| Figura 4.8: Poço P4, localizado na Plataforma NW da ilha Graciosa. | 53 |
| Figura 4.9: Poço P3, localizado na Plataforma NW da ilha Graciosa. | 53 |
| Figura 4.10: Poço P6 é um poço de maré, localizado a E da ilha, perto da linha de costa. | 54 |
| Figura 4.11: Distribuição geográfica dos 17 furos inventariados na ilha Graciosa. | 55 |
| Figura 4.12: Casa da captação do furo F13, que se encontra em manutenção. | 56 |
| Figura 4.13: Furo selado, localizado na Serra das Fontes - F8. | 57 |
| Figura 4.14: Evolução do caudal nas nascentes N6 e N7, medidos entre 2015 e 2018. | 60 |
| Figura 4.15: Caudais mensais da nascente N9, medidos entre 2015 e 2018. | 60 |
| Figura 4.16: Caudais mensais das nascentes N12 a N21, medidos entre 2015 e 2018. | 60 |
| Figura 4.17: Valores mensais da precipitação (mm) e valores médios mensais das cotas piezométricas (m) do poço P1, medidos entre março de 1993 e junho de 1994. | 62 |
| Figura 4.18: Valores mensais da precipitação (mm) e valores médios mensais das cotas piezométricas (m) do poço P2 e P3, medidos entre março de 1993 e junho de 1994. | 62 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.19: Variação média mensal dos caudais (L/min) de algumas nascentes da ilha Graciosa dos anos 2015 a 2018. | 67 |
| Figura 4.20: Cratera do cone vulcânico da Serra Branca. | 67 |
| Figura 4.21: Captação da nascente localizada na Serra Dormida - N7..... | 72 |
| Figura 4.22: Captação da nascente localizada na Serra das Fontes - N13..... | 72 |
| Figura 4.23: Esquema de uma captação por furo com o fenómeno da intrusão salina. | 75 |
| Figura 4.24: Exurgência identificada nos níveis de lapilli intercalados nos níveis de cinza dos depósitos hidromagmáticos do período Pré-Caldeira - Nascente N3..... | 83 |
| Figura 4.25: Domínios e subdomínios hidrogeológicos propostos para a ilha Graciosa..... | 85 |
| Figura 5.1: Localização dos perfis hidrogeológicos integrantes do Modelo hidrogeológico conceptual proposto para a ilha Graciosa. | 90 |
| Figura 5.2: Perfil hidrogeológico conceptual (A-B) proposto para a ilha Graciosa | 95 |
| Figura 5.3: Perfil hidrogeológico conceptual (C-D) proposto para a ilha Graciosa. | 96 |
| Figura 5.4: Perfil hidrogeológico conceptual (E-F) proposto para a ilha Graciosa..... | 97 |
| Figura 5.5: Perfil hidrogeológico conceptual (G-H) proposto para a ilha Graciosa..... | 98 |

Lista de Abreviaturas

$\mu\text{S/cm}$ - Microsiemens por centímetro

abr. - abril

AgNO_3 - Nitrato de prata

ago.- agosto

An. - Anexo

Ar - Árgon

C - Carbono

CE - Condutividade Elétrica

Cent. - Centésinormal

CH_4 - Metano

Cl^- - Cloretos

CM - Câmara Municipal

cm - centímetros

CMA - Crista Média Atlântica

CO_2 - Dióxido de Carbono

Déc. - Décinormal

DEF - Défice

dez. - dezembro

DRA - Direção Regional do Ambiente

DROTRH - Direção Regional do Ordenamento do Território e Recursos Hídricos

E - este

ETP - Evapotranspiração potencial

ETR - Evapotranspiração real

EXC - Excedente

fev. - fevereiro

Fig. - Figura

g/mol - gramas por mol

GPS - *Global Positioning System* (“Sistema de Posicionamento Global”)

H_2 - Hidrogénio

H_2O - Água

H_2S - Ácido Sulfúrico

HCl - Ácido Clorídrico

INE - Instituto Nacional de Estatística

jan. - janeiro

jul. - julho

jun. - junho
K - Potássio
ka - Centenas de anos
km - Quilómetros
m - Metros
mai. - maio
mar. - março
mg/L - miligramas por litro
N - norte
n.º - Número
N₂ - Azoto
NE - nordeste
nov. - novembro
NW - noroeste
°C - Celsius
out. - outubro
PGRH - Plano de Gestão da Região Hidrográfica
PRA - Plano Regional da Água
Rb - Rubídio
Ref. - Referência
REOT - Relatório do Estado do Ordenamento do Território
S - sul
s.l. - Sentido lato
SE - sudeste
set. - setembro
SREA - Secretaria Regional de Estatística dos Açores
Sta. - Santa
SW - sudoeste
T - Temperatura
Tab. - Tabela
ufc/100ml - Unidade de formação de colónias por cem mililitros
W - oeste
ZFEA - Zona de Fratura Este dos Açores
ZFNA - Zona de Fratura Norte dos Açores
ZFOA - Zona de Fratura Oeste dos Açores

1. Introdução

A água é um dos recursos do planeta Terra indispensável para a vida que o habita. Encontra-se por todo o planeta nos diferentes estados físicos (sólido, líquido e gasoso), estando em movimento contínuo na forma de ciclo, alimentado em energia pelo sol.

Ao longo da história, as diferentes civilizações estabeleceram-se e desenvolveram-se sempre em função da disponibilidade da água o que, mais recentemente, após a Revolução Industrial, tem provocado um aumento significativo da pressão exercida pelas sociedades na sua utilização, o que se tem refletido numa diminuição da disponibilidade deste recurso, na sua forma potável, e desencadeado alterações importantes nos sistemas hídricos, modificando tanto as correntes, como a quantidade de água disponível em todo o conjunto de ecossistemas associados. Não obstante, a água continuará a ser indispensável para o desenvolvimento destas mesmas sociedades que a utilizam de uma forma insustentável o que, num futuro possivelmente próximo, na eventualidade da sua degradação, ou mesmo da sua escassez, levará a conflitualidades entre os diferentes povos numa tentativa da sua sobrevivência. É por esta razão que se torna premente abordar cada vez mais a utilização racional da água pelas sociedades, numa perspetiva de disponibilidade futura e não apenas quando as questões surgem oportunamente em problemas de quantidade (excesso, em fenómenos de cheias, ou escassez, em períodos de seca), qualidade (pela presença de agentes microbiológicos patogénicos, ou pela mineralização das águas termais que as tornam eficazes no tratamento de diversas doenças) e custos (dívida ou lucro) associados à sua exploração.

Na ilha Graciosa, pelas suas características geomorfológicas, a carência de água foi sempre uma realidade, atingindo tal gravidade que, no ano 1844, obrigou a que a população retirasse água de uma lagoa subterrânea existente na Furna do Enxofre, uma chaminé vulcânica associada ao último episódio eruptivo da Caldeira (Fig. 1.1), apesar da dificuldade e perigosidade do seu acesso (antes da construção do túnel e da escada em caracol e do conhecimento dos perigos associados à desgaseificação de CO₂, que em 1992 matou duas pessoas). Neste mesmo episódio, a seca atingiu uma amplitude tal que foi necessário virem, da vizinha ilha Terceira, centenas de pipas de água para abastecimento da população, tendo estado programada, também, a utilização de recursos hídricos de outras ilhas do Grupo Central (Bruno, 2010). Foi na sequência desta seca que se determinou a abertura dos poços existentes na Plataforma Noroeste e foram desenvolvidos os diversos sistemas de captação e armazenamento desse bem precioso que ainda existem na ilha, como resposta para ultrapassar a escassez de água, bem de elevado valor, mas de pouca abundância. Nos relatos

históricos existentes refere-se ainda que, no século XIX, foram enviadas da ilha Graciosa pipas de vinho para serem trocadas na ilha de São Jorge por pipas de água.

Foi tendo em atenção as peculiaridades da ilha Graciosa em relação às reservas hídricas que foi desenvolvido este tema, no âmbito do Mestrado em Geociências: ramo do ambiente e ordenamento do território, a fim de caracterizar a hidrogeologia da ilha e propor um modelo hidrogeológico conceptual. Para isso foi necessário realizar um reconhecimento e inventário de pontos de água existentes na ilha, tendo em conta os elementos bibliográficos, nomeadamente as Cartas geológicas e Vulcano-estratigráficas.



Figura 1.1: Vista do bordo NW da Caldeira a partir do Maciço Centro-Meridional.

1.1. Resenha Bibliográfica

A primeira referência à geologia da Ilha da Graciosa foi feita por Hartung (1860), incluída na descrição geológica e geomorfológica geral dos Açores. O primeiro trabalho geomorfológico específico sobre esta ilha foi realizado por Moniz (1884). Alguns anos mais tarde, foi publicado o primeiro estudo petrográfico do Arquipélago, sendo incluídas as lavas da Graciosa (Esenwein, 1930). Berthois (1953) descreveu a variedade litológica das rochas dos Açores, incluindo sedimentos e rochas vulcânicas da Ilha Graciosa.

O primeiro levantamento geológico na ilha foi realizado por Zbyszewski (1970). Baseando-se principalmente em observações petrográficas, publicou o mapa geológico da Graciosa na escala 1: 25.000 (Zbyszewski *et al.*, 1972). Forjaz e Pereira (1976) completaram este estudo com dados estratigráficos e estabeleceram o mapa vulcânico preliminar na escala 1: 25.000. O Vulcão Central foi estudado por Agostinho (1937), Morais (1953), Krejci-Graf (1961) e Saucier (1965), que investigaram a formação da Caldeira, do lago de lava e da Furna do Enxofre. Entretanto, o primeiro estudo da evolução deste vulcão como um todo foi realizado por Maund (1985), que realizou uma detalhada caracterização petrográfica e geoquímica de seus produtos vulcânicos.

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

Todos estes estudos anteriores foram compilados e aprimorados por Gaspar (1996) que, com base no desenvolvimento espaço-temporal dos principais centros eruptivos da ilha e seus depósitos vulcanoclásticos associados, tinha já publicado em Gaspar & Queiroz, (1995) o mais recente mapa vulcano-estratigráfico da ilha Graciosa.

No século XXI, no seguimento dos estudos anteriores, compreenderam o estudo da geoquímica dos produtos vulcânicos (Almeida, 2001), das estruturas tectónicas (Hipólito, 2009), e a evolução magmática da ilha Graciosa (Larrea, 2014). Por fim, a formação e a evolução temporal é desenvolvida por Sibrant *et al.*, (2014) e comentada por Quartau *et al.*, (2015).

Para além disso, os conjuntos de dados petrográficos, geoquímicos e isotópicos da Graciosa foram publicados em artigos que tratam de outras ilhas dos Açores (White *et al.*, 1976; White *et al.*, 1979; Feraud *et al.*, 1980; Lemarchand *et al.*, 1987; França, 1993; Widom & Shirey, 1996; França *et al.*, 2003; Beier *et al.*, 2008; Larrea *et al.*, 2018). Alguns desses estudos incluíram datações de K-Ar (Feraud *et al.*, 1980), datações de ^{14}C (Maund, 1985; Gaspar, 1996), uma idade aparente de Rb-r, calculada por White *et al.* (1976), e datações ^{40}Ar - ^{39}Ar (Larrea, 2014).

O conhecimento da hidrogeologia das ilhas dos Açores sofreu um grande impulso no final do século XX. Na ilha Graciosa centrou-se sobretudo na hidroquímica das massas de água (Cruz & Amaral, 2014; Cruz, Andrade and Coutinho 2014; Cruz *et al.*, 2014, Cruz & Andrade, 2017), na qualidade das águas para consumo humano (Lobo, 1993) e nas águas minerais e termais (Cruz & França, 2006; Cruz *et al.*, 2010; Freire, 2013). A água da lagoa da Furna do Enxofre da Caldeira da Graciosa foi, no âmbito de um o estudo hidrogeoquímico e vulcanológico dos lagos dos Açores, objeto de um trabalho realizado por Antunes (2008). Os processos de salinização têm merecido especial atenção da comunidade científica Açoriana e das instituições governamentais responsáveis pela qualidade da água (Cruz *et al.*, 2011).

1.2. Objetivos

A realização do presente estudo tem como objetivos principais:

- A caracterização hidrogeológica - definição de domínios aquíferos e avaliação da hidrodinâmica e da hidroquímica das massas de água subterrâneas - da ilha Graciosa, Açores;
- A construção de um Modelo hidrogeológico conceptual;
- A apresentação de propostas para a melhor gestão e uso da água naquela ilha (proteção de massas de água e captações existentes; locais e processos para a implantação de novas captações, etc.).

Enquanto objetivos secundários indicam-se:

- A definição do enquadramento físico geral do domínio em estudo (topografia, hidrografia, climatologia, uso e ocupação do solo);
- A caracterização geológica.

1.3. Metodologias

O desenvolvimento do presente estudo baseou-se nas seguintes atividades e processos metodológicos (Fig. 1.5):

Consulta bibliográfica

Consulta de trabalhos, teses e artigos já realizados na ilha da Graciosa, na área da geologia e hidrogeologia.

Consulta de elementos relativos aos pontos de água (por exemplo, relatórios de furo, histórico de caudais e elementos analíticos).

Reconhecimento, ensaios e medições de campo

Efetou-se a inventariação e caracterização *in situ* de pontos de água subterrânea (nascentes, poços e furos). Com base na observação e nos equipamentos utilizados, caracterizam-se pelos seguintes critérios:

- Georreferenciação, com recurso ao GPS e ao programa *Google Earth*;
 - Definição do enquadramento físico geral;
 - Caracterização geológica, hidrogeológica e estrutural;
 - Caracterização físico-química da água (*in situ*), utilizando um condutivímetro (Modelo: *WTW: pH/Cond 3320*) (Medição de parâmetros, condutividade ($\mu\text{S/cm}$) e Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (Fig. 1.2 - A);
 - Medição do nível freático dos poços;
 - Amostragem de água realizada com um recipiente de polietileno (Fig. 1.2 - B).
- Neste processo utilizaram-se fichas de procedimentos de campo (Azevedo, 2014).



Figura 1.2: Ensaio e medições de campo. (A - Análise físico-química da água (in situ); B - Amostragem de água. 1. - Caderno de campo; 2. - Condutivímetro (Modelo: WTW: pH/Cond 3320); 3. - Sensor incorporando células de medição de condutividade elétrica; 4. - Pequeno copo com água colhida no local para medição in situ; 5. - Recipiente de polietileno).

Ensaio e determinações de laboratório

Nas amostras colhidas na campanha de campo efetuou-se a determinação de Cloretos em Laboratório, pelo método de Mohr, em concentrações de mg/L (Fig 1.3), no laboratório de química analítica do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade dos Açores.

Método de Mohr:

Introduz-se 100ml da amostra numa matraz de 250ml, onde são adicionadas duas ou três gotas da solução de nitrato de prata (AgNO_3) cent (169,875 g/mol), um pouco de carbonato de cálcio e 5 gotas de solução de cromato de potássio a 10%.

Procede-se à titulação com uma bureta. A solução na presença do AgNO_3 desenvolve uma cor laranja a avermelhada (Fig. 1.3).

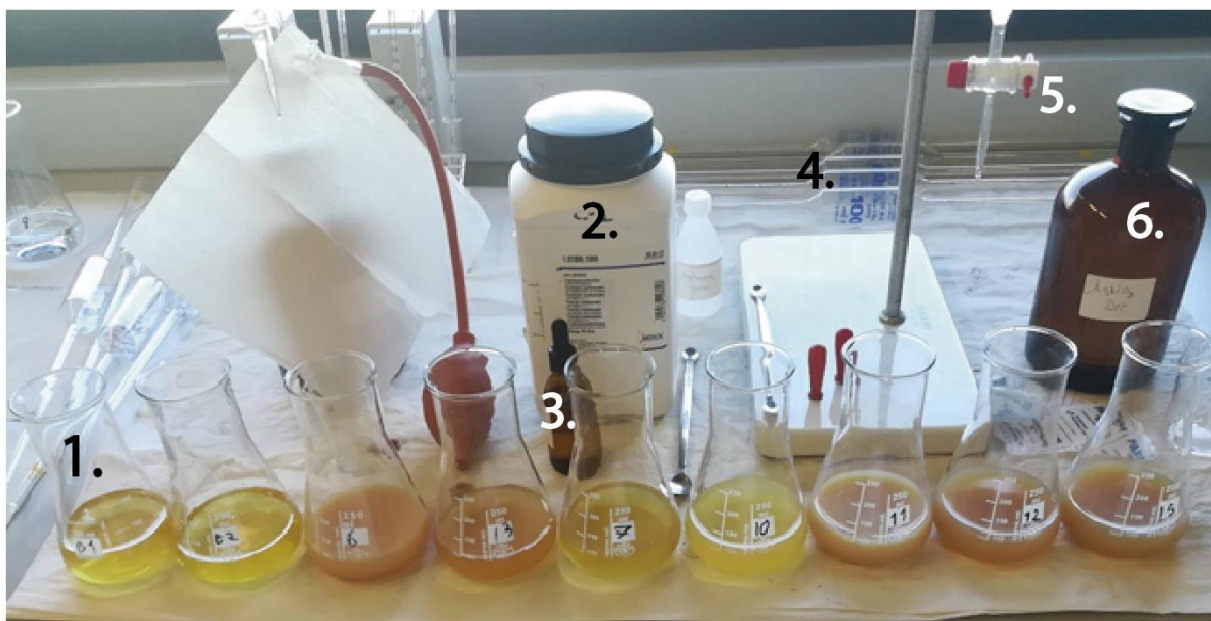


Figura 1.3: Resultados de algumas titulações com AgNO_3 . (1. - Matraz; 2. - Carbonato de cálcio; 3. - Solução de cromato de potássio a 10%; 4. - Pipeta volumétrica; 5. - Bureta; 6. - Nitrato de Prata).

Atividades de gabinete

No conjunto das atividades de gabinete, destacam-se:

- A compilação e o tratamento das fichas descritivas de cada ponto de água previamente preenchidas no campo;
- A integração e interpretação de dados, relacionando os dados de campo com os dados bibliográficos;
- Tratamento e criação de imagens utilizando o *software Illustrated*;
- Elaboração do modelo hidrogeológico conceptual com base em cartografia e perfis geológicos já existentes e redesenhados.

No mês de abril procedeu-se à elaboração de um póster com os trabalhos em curso, apresentado no *WIPday* realizado pelo Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra (Fig.1.4).

Hidrogeologia de Ilhas Vulcânicas O caso de estudo da Ilha Graciosa (Açores)

Introdução

A ocorrência, circulação e armazenamento da água subterrânea nas ilhas vulcânicas em geral, e nas dos Açores, em particular, mostram especificidades diferentes de outros meios geológicos que se traduzem por uma acentuada heterogeneidade e anisotropia das condições hidrogeológicas. A construção insular a partir de diversas erupções vulcânicas, e de fatores secundários, como a alteração ou fracturação das rochas, que podem aumentar ou diminuir as condições hidrogeológicas das formações rochosas (Cruz, 1997).

Enquadramento geral

A ilha da Graciosa localiza-se sobre uma secção do rife da Terceira que delimita as placas Euroasiática da Africana. Apresenta um relevo pouco acentuado, onde o ponto mais elevado atinge os 402m (Fig.1), o que proporciona baixos valores de precipitação média anual (918,4 mm). É constituída por rochas e depósitos vulcânicos organizados em 3 Unidades: Complexo vulcânico da serra das Fontes, mais antiga e de natureza basáltica (s.l.); Complexo vulcânico da serra Branca, de natureza traquítica (s.l.) e Complexo vulcânico de Vitória, mais recente e apresentando um vasto leque petrográfico que vai desde basaltos aos traquitos (Gaspar, 1996).

Objetivos

Principais:

- Avaliação e caracterização de aquíferos, massas de água, hidrodinâmica e hidroquímica;
- Construção de um Modelo hidrogeológico conceptual;
- Apresentação de propostas para a melhor gestão e uso da água (proteção de massas de água e captações existentes; locais e processos para a implantação de novas captações, etc)

Secundários:

- Definição do enquadramento físico do domínio em estudo (topografia, hidrografia, climatologia, uso e ocupação do solo)
- Caracterização geológica

Resultados

Do ponto de vista hidrogeológico, as estruturas mais relevantes em ilhas vulcânicas são: o complexo de base da ilha; diques; paleossolos; grandes deslizamentos de terra e depósitos de cinzas. Estas terão, normalmente, um comportamento impermeável responsável pela formação de massas de água. Enquanto que as formações rochosas como as escoadas lávicas e os depósitos piroclásticos, apresentam permeabilidades elevadas, que desempenharão o papel de armazenamento ou circulação das águas subterrâneas.

Em meio vulcânico os sistemas aquíferos revelam um elevado grau de compartimentação, existindo dois tipos de sistemas distintos.

O sistema aquífero basal localizado à cota zero, correspondendo a uma lenticula de água doce que sobrenada água salgada, o que implica um constrangimento na sua exploração e um significativo impacto sobre a qualidade do recurso.

Os sistemas aquíferos suspensos surgem associados a níveis pouco permeáveis. Dependendo das características do terreno podem ocorrer de formas múltiplas e/ou sobrepostas no mesmo maciço (Rodrigues, 2002).

Foram identificadas 22 nascentes, 17 furos e 6 poços (Fig. 3). Realizou-se uma medição *in situ* dos parâmetros de pH, condutividade elétrica e temperatura. Em Laboratório determinou-se a concentração em Cloretos pelo Método de Mohr.

Conclusões

Através dos pontos de água podemos identificar sistemas aquíferos suspensos e basais. Os furos estão apenas associados a aquíferos basais, por outro lado, as nascentes e poços a elevada altitude correspondem a descargas de aquíferos suspensos, enquanto os pontos de água junto da linha de costa correspondem, normalmente, ao aquífero basal da ilha.

Na Tabela 1, com os dados dos cloretos é possível concluir que o aquífero basal contém maior concentração deste composto, associado ao NaCl da água do mar.

A fig. 4 corresponde a exemplos de nascentes, onde é possível identificar um nível impermeável (paleossolo) (B), e a composição do nível permeável (aquífero) formado por piroclastos de queda (A).



Fig. 1- Vista da Caldeira a partir do Maciço centro-meridional.

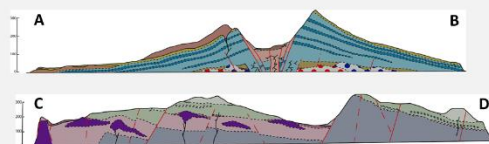


Fig. 2. Cortes geológicos A-B e C-D (localização Fig. 3, adaptado de Gaspar, 1996)

Metodologias

- Consulta bibliográfica;
- Inventariação e caracterização, *in situ*, de pontos de água;
- Determinação de Cloretos em laboratório;
- Realização de fichas descritivas dos pontos de água;
- Integração e interpretação de dados

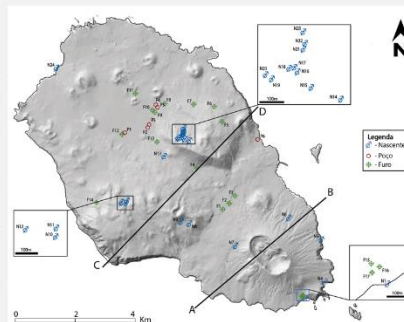


Fig. 3. Geomorfologia da ilha Graciosa com localização dos pontos de água. (adaptado de DROTRH, 2001).



Fig. 4. Exemplos de pontos de água estudados. Nascente N11; Nascente N5

Tabela 1. Exemplo de resultados de análises da água (05 Jan, 2019)

| Ref. | pH | Cloretos (mg/L) |
|------|------|-----------------|
| N5 | 7,88 | 92,00 |
| N10 | 7,40 | 67,09 |
| F1 | 7,11 | 186,89 |
| F13 | 7,52 | 321,06 |
| P3 | 7,28 | 58,46 |

Azevedo, J.M.M., 1998. Geologia e Hidrogeologia da ilha das Flores (Açores - Portugal). Tese de Doutoramento em Hidrogeologia. Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra. Vol 1; 140 p.
Cruz, J.V., Andrade, C., 2017. Groundwater salinization in Graciosa and Pico Islands (Azores archipelago, Portugal): processes and impacts. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 12 (2017) 69-87.
DROTRH, IA, 2001. Plano Regional da água - Relatório Técnico - versão para consulta pública. Ed. Secretaria Regional do Ambiente, Direção regional do Ordenamento do Território e dos Recursos hídricos, 414 p.
Gaspar, J. L., 1996. Ilha Graciosa (Açores): História Vulcanológica e Avaliação do Hazard. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia. Departamento Geociências, Universidade dos Açores, 361p
Rodrigues, F. C., 2002. Hidrogeologia da ilha Terceira. Tese de Doutoramento. Departamento de Ciências Agrárias, Universidade dos Açores, 415 p.

Figura 1.4: Póster apresentado no evento WIPday realizado pelo Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, no dia 30 de abril de 2019.

1.4. Fluxograma

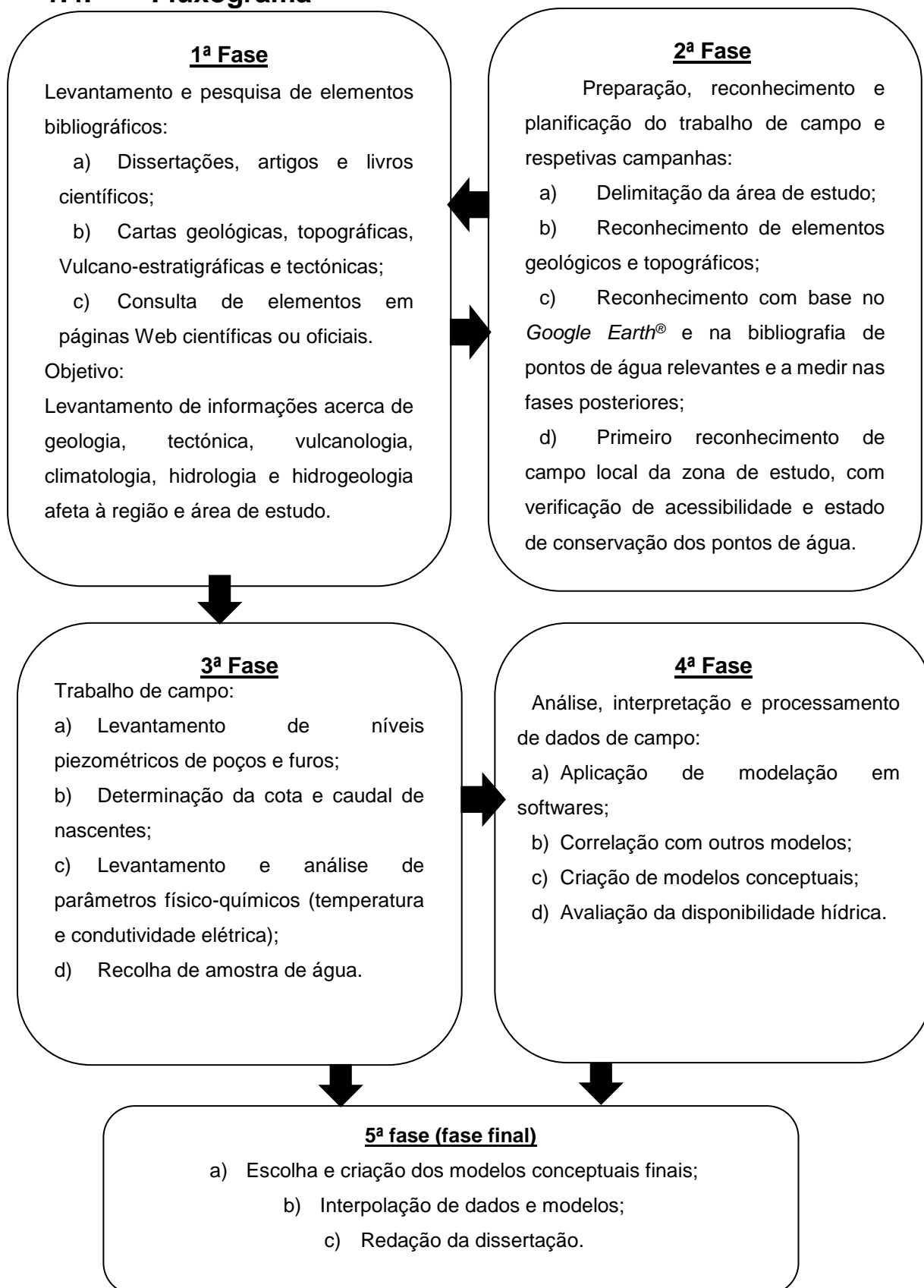


Figura 1.5: Fluxograma das atividades e processos metodológicos.

2. Enquadramento Geral

Neste capítulo apresenta-se o enquadramento geral do Arquipélago dos Açores, caracterizando a geografia, climatologia, hidrografia e geologia regional. Este enquadramento físico fornece o ponto de partida para os dados que auxiliam ou complementam o entendimento dos aspetos regionais onde se insere a ilha Graciosa.

2.1. Enquadramento Geográfico

A ilha em estudo situa-se no Arquipélago dos Açores. Este Arquipélago localiza-se no norte do Oceano Atlântico, a cerca de 1430 km do Continente Europeu e, aproximadamente, a 3900 km da América do Norte, sendo o Arquipélago da Madeira o ponto mais próximo a 900 km.

O Arquipélago dos Açores é formado por nove ilhas e diversos ilhéus, de dimensões muito diferentes, e apresenta uma orientação segundo um eixo WNW-ESE, limitado pelas latitudes 36° 55' 39" e 39° 43' 34" N e pelas longitudes 24° 46' 15" e 31° 16' 24" W (PGRH-Açores, 2012) (Fig. 2.1).

Sob o ponto de vista geográfico, as ilhas distribuem-se por três grupos: o Grupo Ocidental (ilhas do Corvo e Flores), o Grupo Central (ilhas Graciosa, Terceira, São Jorge, Faial e Pico), e o Grupo Oriental (ilhas de São Miguel e Santa Maria e os ilhéus das Formigas). O Grupo Central distancia-se cerca de 150 km do Grupo Oriental e 240 km do Grupo Ocidental.

A superfície do Arquipélago dos Açores compreende uma área de 2 321,96 km², representando 2,6% do território nacional (92 225,62 km²). Contudo, as nove ilhas exibem uma acentuada desigualdade territorial, variando entre 744,57 km² (Ilha de São Miguel) e 17,11 km² (Ilha do Corvo), a maior e a mais pequena parcela, respetivamente. Cinco delas apresentam dimensões intermédias: Ilha do Pico (444,80 km²), Ilha Terceira (400,27 km²), Ilha de São Jorge (243,65 km²), Ilha do Faial (173,06 km²) e Ilha das Flores (140,96 km²). As ilhas de Santa Maria (96,89 km²) e da Graciosa (60,66 km²) possuem menor representatividade territorial. As três maiores, São Miguel, Terceira e Pico, correspondem a quase 70% da superfície regional (SREA, 2017).

A ilha Graciosa é a mais setentrional das ilhas do Grupo Central do Arquipélago dos Açores e localiza-se entre os 39° 05' 50" (a norte da povoação da Achada) e os 39° 00' 31" (a sul do Carapacho) de latitude norte e entre os 27° 56' 53" (Ponta da Engrade) e os 28° 04' 21" (a sul do Porto Afonso) de longitude oeste. Apresenta uma orientação NW-SE.

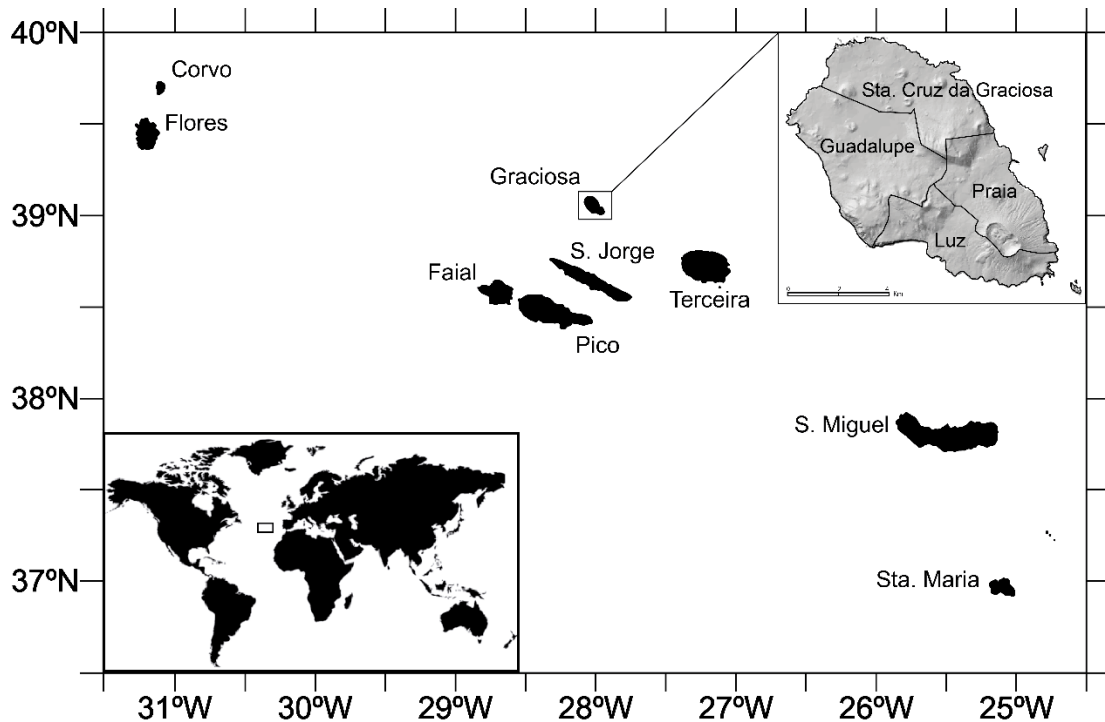


Figura 2.1: Enquadramento geográfico do Arquipélago dos Açores e da ilha Graciosa.

2.2. Enquadramento Administrativo

O Arquipélago dos Açores constitui uma Região Autónoma da República Portuguesa, integrando a União Europeia com o estatuto de região ultraperiférica (territórios geograficamente distantes).

Sendo uma Região Autónoma, constitui órgãos de governo próprio, nomeadamente, a Assembleia Legislativa Regional, sediada na cidade da Horta, e o Governo Regional, com departamentos nas cidades de Ponta Delgada, Angra do Heroísmo e Horta. Em relação à administração local, existem 19 concelhos e 156 freguesias (REOT-A, 2003).

O departamento com competências ao nível do planeamento e gestão dos recursos hídricos é a Direção de Serviços de Recursos Hídricos e Ordenamento do Território (DSRHOT), da Direção Regional do Ambiente (DRA). A Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos dos Açores (ERSARA) exerce as funções reguladoras e orientadoras nos sectores de abastecimento público de água para consumo humano, das águas residuais urbanas e dos resíduos e, complementarmente, funções de fiscalização e controlo da qualidade da água para consumo humano. Tanto a DRA como a ERSARA são serviços dependentes da Secretaria Regional da Energia, Ambiente e Turismo (SREAT).

Relativamente à organização administrativa da ilha Graciosa, esta tem um único concelho, o município de Santa Cruz, subdividido em 4 freguesias: Guadalupe, Luz, Praia e

Santa Cruz da Graciosa. Todos os núcleos populacionais revelam traços de grande ruralidade, pois a economia da ilha está profundamente ligada à atividade agropecuária.

O Departamento de Recursos Hídricos da Câmara Municipal de Santa Cruz da Graciosa é quem gere as captações, reservatórios e abastecimento de água e saneamento na ilha.

2.3. Enquadramento Hidroclimatológico

O clima do Arquipélago dos Açores é fortemente condicionado pela localização geográfica das ilhas no contexto da circulação global atmosférica e oceânica e pela influência da massa aquática da qual emergem (Azevedo, 2015).

A sua localização entre o trópico de Câncer e o Círculo Polar Ártico confere um clima temperado, dando uma sazonalidade marcada pelas quatro estações.

A Região situa-se na zona de transição de massas de ar, onde a célula anticiclónica, designada como Anticiclone dos Açores, condiciona a variação sazonal do clima insular com a sua posição, intensidade, orientação e desenvolvimento. No verão, a deslocação do Anticiclone para norte conduz ao afastamento da Frente Polar para latitudes mais elevadas, permitindo a circulação de massas de ar quentes e húmidas com origem subtropical sobre o Arquipélago. Enquanto no inverno, pelo contrário, a sua localização a sul do Arquipélago faz descer a Frente Polar, sujeitando as ilhas às massas de ar frias e secas de proveniência subpolar (Azevedo, 2015).

A relação do Arquipélago com o subsistema climático oceânico é determinante para a configuração do respetivo clima. A sua importância nos processos climáticos manifesta-se a nível energético, dinâmico e termodinâmico. Neste contexto, a influência da corrente marítima do Golfo faz-se sentir pela fonte de vapor de água para a atmosfera e pela barreira contra as correntes de águas frias superficiais de origem setentrional, tendo um efeito moderador no clima, mantendo a humidade elevada e uma regularidade térmica anual ao nível do mar.

Estes fatores contribuem para que o clima dos Açores se caracterize pelas reduzidas amplitudes térmicas, com índices de humidade do ar elevado, taxas de insolação pouco elevadas, chuvas regulares e abundantes, e por um regime de ventos vigorosos. Em particular, os invernos, podendo ser chuvosos, não se manifestam excessivamente rigorosos. A ocorrência de neve, sendo esporádica, só ocorre nas zonas altas (Rodrigues, 2002; REOT-A, 2003; PGRH-Açores, 2012; Azevedo, 2015).

Dentro de cada ilha assiste-se a uma estratificação das condições climáticas determinada pela altimetria. Assim sendo, as assimetrias significativas no interior de cada ilha estão relacionadas com a forma e a orientação do relevo, com as estruturas geológicas superficiais

(estrato-cones vulcânicos; caldeiras; falésias), com a vegetação bem como, em alguns casos, com a influência recíproca de ilhas vizinhas (Azevedo, 2015).

Embora se verifique uma variação das condições climáticas de um extremo ao outro do Arquipélago e ainda uma variação espacial significativa dentro de cada ilha, o seu clima pode ser classificado de mesotérmico húmido com características oceânicas (Azevedo, 2015).

Com base nos valores médios normais do clima dos Açores apresentam-se nos próximos tópicos as apreciações genéricas sobre os diversos parâmetros climatológicos.

2.3.1. Precipitação Atmosférica

A precipitação ocorre durante todo o ano, mesmo nos meses de estio, embora nestes com muito menor expressão. A precipitação de origem frontal é significativamente reforçada pela precipitação de origem orográfica no interior de cada ilha (Azevedo, 2015).

A precipitação média anual sobre as nove ilhas dos Açores é de 1 930 mm, oscilando entre os 966 mm na ilha Graciosa e 2 647 mm na ilha das Flores. No que respeita ao regime pluviométrico, verifica-se dois períodos distintos, concentrando nos meses de outubro a março cerca de 75% da precipitação anual (DROTRH, 2001).

2.3.2. Humidade Atmosférica

A humidade relativa do ar dos Açores caracteriza-se por ser elevada ao longo de todo o ano, apresentando valores médios mensais próximos dos 80%. São raros os dias em que se observam valores abaixo dos 50%. Os valores da humidade relativa variam ao longo do dia acompanhando de forma inversa a evolução diária da temperatura do ar. Dada a predominante origem tropical das massas de ar que assolam as ilhas por sul, bem como aos fenómenos de condensação e deposição de água nas zonas mais altas, a humidade do ar tende a ser inferior na costa norte quando comparada com a observada nas costas viradas a sul. (Azevedo 2015).

2.3.3. Temperatura Atmosférica

De acordo com a classificação de *Köppen*, o clima dos Açores está abrangido pela categoria dos climas temperados quentes, caracterizados por apresentarem quatro estações e a temperatura média do mês mais frio apresentar-se inferior a 18°C e superior a -3°C. As

características oceânicas acentuam-se de Oriente para Ocidente, revelando-se as ilhas das Flores e Corvo como as que apresentam características mais oceânicas (Azevedo, 2015).

Junto ao litoral, a temperatura média anual em todo o Arquipélago ronda os 17,5 °C. Nas mesmas circunstâncias de localização, os valores médios mensais são sempre superiores a 10°C. Em altitude, a temperatura decresce de forma regular até ser atingida a temperatura do ponto de orvalho a uma altitude que se situa, em média, próxima dos 400 metros. A partir daí, dada a cedência de energia à atmosfera pelo processo de condensação, a temperatura decresce de uma forma menos brusca. A amplitude térmica média anual da variação diurna é baixa, próxima dos 5°C, tendo tendência a ser superior na costa norte das ilhas (Azevedo, 2015).

2.3.4. Vento

O vento é uma constante do clima açoriano. Ao longo do ano o vento sopra de forma regular, mais moderado nos meses de verão e de forma mais intensa nos meses de inverno. Situadas em plena zona de confluência de diferentes sistemas de circulação atmosférica, as ilhas são abordadas tanto por ventos que derivam do bordo superior do Anticiclone dos Açores, como por aqueles gerados a partir dos sistemas depressionários associados à evolução dos meandros da Frente Polar. Em todo o ano predominam os ventos do quadrante oeste. Verifica-se, no entanto, um incremento dessa predominância das ilhas do Grupo Oriental para as do Grupo Ocidental. O regime médio dos ventos junto ao litoral é, em larga medida, “viciado” pela topografia. A sua velocidade média anual é da ordem dos 17 Km/h (média de 20 Km/h no inverno; 10 Km/h no verão). Verifica-se um aumento médio da velocidade do vento das ilhas do Grupo Oriental para as do Grupo Ocidental. Em todas as ilhas a velocidade do vento aumenta com a altitude (Azevedo, 2015).

2.4. Caracterização Hidrográfica

As características hidrográficas de um território traduzem a conjugação de vários fatores: a geomorfologia, a partir das formas de relevo configura-se as formas das bacias; a geologia, como a suscetibilidade à erosão e a permeabilidade; climatologia, através da distribuição espacial e temporal da precipitação; e a ocupação do solo, influenciando a ocorrência superficial.

As formas de relevo são responsáveis, em grande parte, pela forma assumida pelas redes hidrográficas, devido ao escasso desenvolvimento erosivo da paisagem. A maior

capacidade e densidade de drenagem verifica-se nas vertentes mais inclinadas, onde dominam pastagens permanentes, originando bacias hidrográficas mais estruturadas.

É comum num ambiente insular jovem que as generalidades das bacias hidrográficas apresentem pequena dimensão. As bacias melhor estruturadas desenvolvem-se a partir das zonas mais pluviosas do interior das ilhas. Nos Açores, a de maior dimensão tem cerca de 30 km². Da mesma forma, os cursos de água não têm grande desenvolvimento, sendo irregulares e de perfil jovem. Em termos de comprimento, o mais extenso tem 29 km, pelo que na região não se considera uma designação de rios, mas sim ribeiras (Rodrigues, 2002).

As lagoas do Arquipélago ocorrem em depressões resultantes, na maior parte dos casos, do colapso de bolsas magmáticas dos antigos vulcões (“caldeiras”), conduzindo à formação de bacias endorreicas. Em torno dos cones vulcânicos, a rede de drenagem superficial tende a distribuir-se de forma radial (DROTRH, 2001).

A reduzida dimensão das ilhas, a génese vulcânica que determina a geomorfologia e geologia, assim como a especificidade do clima, conduz a que a drenagem superficial, essencialmente em regime temporário (ou intermitente), ocorra muitas vezes na forma de escoamento do tipo torrencial ou efémero. Esta generalidade não impede que ocorram cursos de água permanentes, estando estas situações dependentes de descargas profundas de lagoas ou da ocorrência de nascentes associadas a aquíferos suspensos (PGRH-Açores, 2012).

As zonas de infiltração ocorrem, preferencialmente, nas formações basálticas (sentido lato - *s.l.*) pouco alteradas, revestidas por estruturas arbustivas da vegetação natural (DROTRH, 2001). De facto, os solos onde faltam substratos argilosos, fraturados pela atividade tectónica, apresentam grande permeabilidade (REOT-A, 2003). Noutros casos, encontram-se ocupadas por espessas turfeiras de esfagno que contribuem para a acumulação de importantes reservas hídricas, que recarregam os aquíferos, desempenhando assim funções de regulação do sistema hidrológico das ilhas (Azevedo, 1998).

No Arquipélago dos Açores, a atividade humana já exerce um impacto significativo na hidrologia de superfície e, conseqüentemente, sobre as restantes variáveis do ciclo hidrológico. A construção de estradas e acessos nas partes mais altas das ilhas têm uma influência cada vez mais negativa no sistema de drenagem, alterando o coberto vegetal, os padrões de infiltração e a configuração da própria rede hidrográfica (PGRH-Açores, 2012).

2.5. Enquadramento Geológico Regional

2.5.1. Enquadramento Geomorfológico

As 9 ilhas vulcânicas emergem de uma Plataforma oceânica definida pela linha isobatimétrica dos 2000 m de profundidade (Needham & Francheteau, 1974; Searle, 1980; Lourenço *et al*, 1998). Esta Plataforma apresenta uma morfologia de forma triangular onde, para além de ilhas, expressa-se pela existência de vários ilhéus, montes, cristas, bacias e fossas submarinas.

A morfologia da Junção Tripla dos Açores é controlada por dois conjuntos de falhas conjugadas que condicionam o desenvolvimento e a forma das bacias e constituem o enquadramento para o surgimento do vulcanismo, tanto nas suas interseções (construções de montes submarinos), como também ao longo dos principais acidentes (desenvolvimento de cristas vulcânicas). Este padrão é notável ao longo do eixo Graciosa - São Miguel, mas está bem desenvolvido em todo o Planalto dos Açores.

A geomorfologia das várias ilhas resulta, essencialmente, do somatório dos inúmeros episódios de natureza vulcânica, que ao longo da história geológica de cada uma delas se foram sobrepondo, intercalando com períodos erosivos (França, Cruz, Nunes & Forjaz, 2003).

O vulcanismo e a tectónica regional e local explicam o alinhamento das ilhas e a disposição dos principais aparelhos eruptivos, enquanto que as formas de relevo são condicionadas pelos estilos eruptivos (efusivos e explosivos), pela dinâmica evolutiva e pelo estado mais ou menos avançado dos processos de erosão (PGRH-Açores, 2012). A regularidade dos episódios eruptivos faz com que as ilhas sejam pouco evoluídas em termos geomorfológicos (Azevedo, 1998).

A evolução das ilhas oceânicas resulta da interação entre construção e destruição vulcânica por uma larga variedade de processos. Grandes deslizamentos de terra são conhecidos como um dos mais eficientes processos da destruição catastrófica das ilhas vulcânicas. Consequentemente, em regiões perto de limites de placa, afetadas por uma grande atividade tectónica, há uma instabilidade gravitacional a grande escala, tipicamente associada a grandes falhas. Estas instabilidades podem envolver o desenvolvimento de lentos ou graduais movimentos de terra rotacionais (Sibrant, Marques & Hildenbrand, 2014; Sibrant, 2014; Quartau, Hipólito, Mitchell, Gaspar, & Brandão, 2015).

2.5.2. Enquadramento Estrutural

A Plataforma dos Açores é caracterizada pela sua geodinâmica complexa, relacionada com a proximidade do contacto de três placas tectónicas na crista oceânica: placas Norte-Americana, Euroasiática e Africana.

A dinâmica regional é dominada pela presença de importantes estruturas tectónicas, de entre quais se destacam: Crista Médio Atlântico e suas falhas transformantes; Rifte da Terceira; Zona de Fratura Este dos Açores; Falha da Glória; Zona de Fratura Oeste dos Açores; e Zona de fratura Norte dos Açores (Fig. 2.2) (Lourenço *et al.*, 1998; Pacheco *et al.*, 2013).

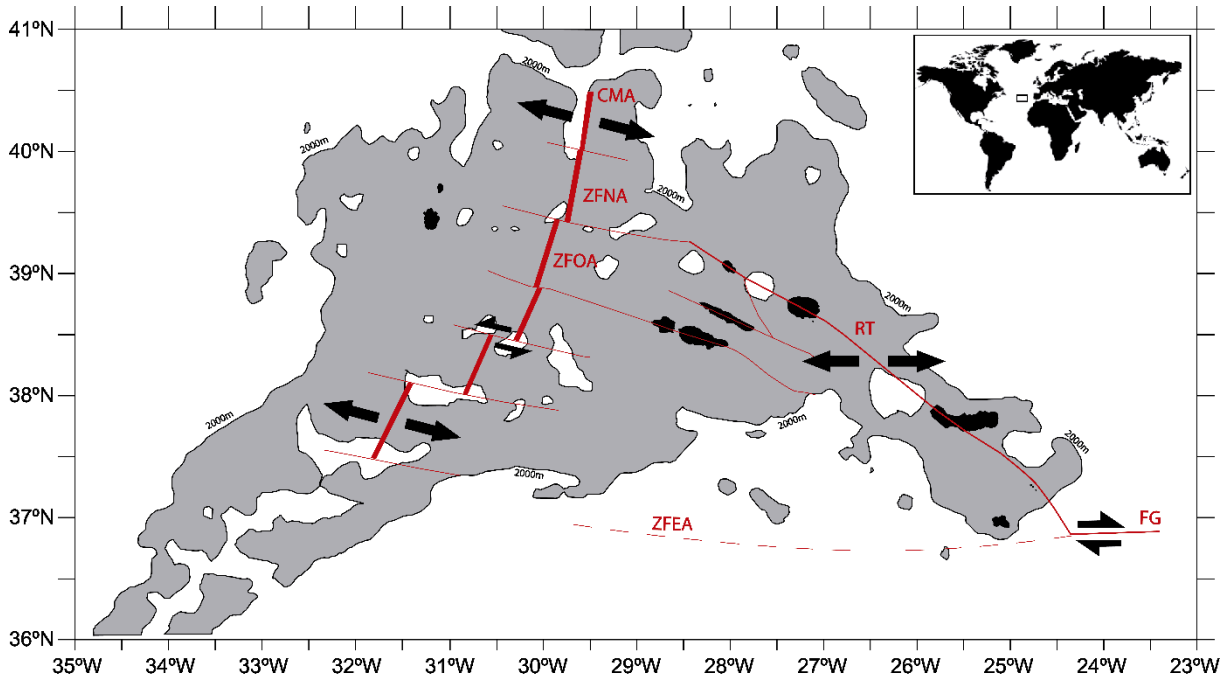


Figura 2.2: Carta tectónica do Arquipélago dos Açores com os limites batimétricos da Plataforma dos Açores. (A Negro - Representa a área emersa, nomeadamente as ilhas; a Cinzento - Toda a área submersa com profundidade inferior a 2000 m; a Branco - A área submersa com profundidade superior a 2000 m; a Vermelho - Os alinhamentos tectónicos. CMA - Crista Média Atlântica; FG - Falha da Glória; RT - Rifte da Terceira; ZFEA - Zona de Fratura Este dos Açores; ZFNA - Zona de Fratura Norte dos Açores; ZFOA - Zona de Fratura Oeste dos Açores).

2.5.2.1. Crista Média Atlântica (CMA)

A CMA estende-se de norte a sul do Atlântico, é uma estrutura distensiva pura, correspondendo ao eixo de expansão da crosta oceânica das placas que limita. Na região do Arquipélago dos Açores separa a placa Norte-Americana, que se encontra a oeste, e as placas Euroasiática e Africana, que se desenvolvem para leste deste acidente tectónico. A análise

pormenorizada da junção tripla dos Açores sugere que a taxa de expansão da CMA a sul dos Açores é mais baixa do que a norte deste mesmo Arquipélago (Krause & Watkins, 1970).

Na interseção com a Plataforma dos Açores é apresentada uma orientação média de NE-SW, em resultado de um conjunto de falhas transformantes que a segmentam em inúmeros troços muito curtos, demonstrando uma tendência geral com direção E-W (Searle, 1980; França *et al.*, 2003; PGRH-Açores, 2012; Pacheco *et al.*, 2013).

2.5.2.2. Zonas de Fraturas dos Açores

A Fratura Este dos Açores (ZFEA), inicialmente designada por Fratura Açores-Gibraltar, representa o segmento oeste de uma das mais importantes zonas de fraturas do Globo Terrestre - o Arco Tectónico Alpino. O limite entre as placas Euroasiática e Africana, para leste dos Açores, é estabelecido por um troço da Fratura Açores-Gibraltar, atualmente conhecido por Falha Glória.

A zona de Fratura Oeste dos Açores (ZFOA) parece corresponder ao prolongamento, para W da ZFEA. As duas estruturas apresentam sensivelmente a mesma direção W-E, embora a ZFOA se desenvolva mais a norte. Esta estrutura, referida inicialmente por Tolstoi (1951; *in* Krause & Watkins, 1970), é também designada por Zona de Fratura do Pico.

A zona de Fratura Norte (ZFNA) dos Açores encontra-se à latitude 39°30'N, exatamente na região em que a CMA se apresenta desviada cerca de 15 km para leste. Searle (1980) considerou que esta estrutura, de direção aproximada E-W, parecia corresponder a uma fratura sem características de falha transformante (França *et al.*, 2003).

Estas fraturas prolongam-se até à Crista média oceânica e, apesar de ter uma expressão morfológica relativamente nítida, a sismicidade é praticamente nula, sugerindo tratar-se de estruturas inativas ou com um grau de atividade muito baixa, alegando que estas estruturas não devem ser consideradas pelo seu sentido dinâmico, mas sim no sentido estrutural. A leste, a Falha da Glória caracteriza-se por importantes atividades sísmicas com eventos de magnitude elevada (Krause & Watkins, 1970; França *et al.*, 2003; Pacheco *et al.*, 2013).

2.5.2.3. Rifte da Terceira

O Rifte da Terceira é definido pelo alinhamento que separa a placa Euroasiática da Africana, neste setor. Com uma orientação geral WNW-ESSE, é sensivelmente coincidente com a disposição das ilhas dos Grupos Oriental e Central dos Açores.

Caracterizada por um comportamento distensivo e de desligamento direito associados a fenómenos sísmicos e vulcânicos (PGRH-Açores, 2012). A orientação definida pelo

alinhamento de uma série de elevações (ilhas e bancos submarinos) e além destes alinhamentos, também é constituído por uma série de bacias “*en échelon*” separadas por cristas e maciços vulcânicos (Searle, 1980), compreendendo de NW para SE: 1 - Bacia Oeste da Graciosa; 2 - Ilha Graciosa; 3 - Bacia Este da Graciosa; 4 - Ilha Terceira; 5 - Crista Submarina da Terceira; 6 - Fossa Norte do *Hirondelle*; 7 - Banco D. João de Castro; 8 - Fossa Sul do *Hirondelle*; 9 - Ilha de S. Miguel; 10 - Fossa da Povoação; 11 - Ilhéus das Formigas; 12 - Fossa das Formigas (Fig.1.3) (Searle, 1980; França *et al.*, 2003; Pacheco *et al.*, 2013).

Em sentido lato inclui também as fraturas Faial-Pico e de S. Jorge que, com uma direção geral WNW-ESE, convergem para leste em direção à Falha da Glória.

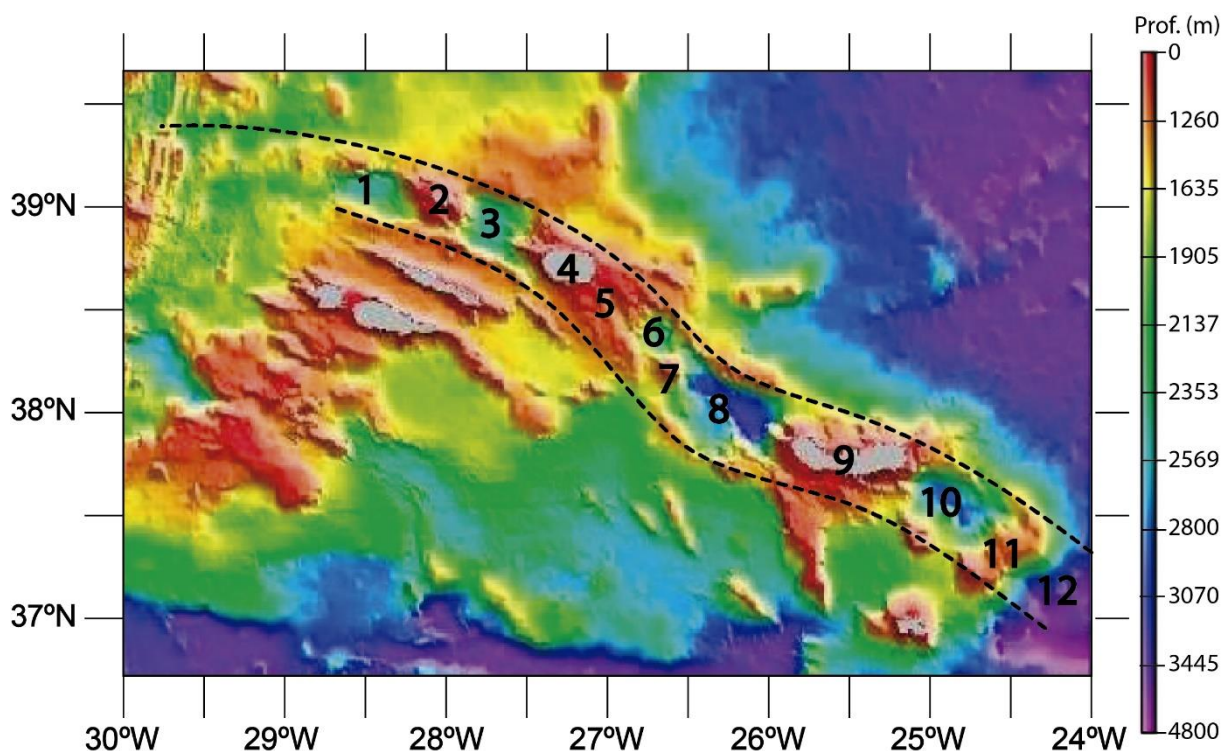


Figura 2.3: Carta batimétrica detalhada da região central e ocidental da Plataforma dos Açores. (1 - Bacia Oeste da Graciosa; 2 - Ilha Graciosa; 3 - Bacia Este da Graciosa; 4 - Ilha Terceira; 5 - Crista Submarina da Terceira; 6 - Fossa Norte do *Hirondelle*; 7 - Banco D. João de Castro; 8 - Fossa Sul do *Hirondelle*; 9 - Ilha de S. Miguel; 10 - Fossa da Povoação; 11 - Ilhéus das Formigas; 12 - Fossa das Formigas) (Fonte: GeoMap App).

2.5.2.4. Enquadramento Sísmico-Vulcânico

Atendendo à origem vulcânica do Arquipélago e da Plataforma dos Açores, a atividade eruptiva na região inclui eventos submarinos e subaéreos, que cobrem um grande leque de estilos eruptivos de diferentes magnitudes.

A nível submarino pode-se observar dois tipos de formações vulcânicas: montes submarinos circulares (com alturas que variam de 200 m a 1000 m) e cristas vulcânicas, com orientação geral de noroeste para sudeste (Lourenço *et al.*, 1998).

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

A atividade vulcânica responsável pela existência das ilhas varia das erupções efusivas (caracterizadas pelo derrame estável de lava), a eventos explosivos, com violenta fragmentação da lava (Cruz *et al.*, 2011).

Muito do conhecimento que hoje se tem sobre a vulcanologia dos Açores deve-se à observação de vários eventos vulcânicos, designados por erupções históricas. A história vulcanológica do Arquipélago põe em evidência a ocorrência de variados estilos eruptivos ao longo da construção das ilhas. As erupções subaéreas são de carácter efusivo ou moderadamente explosivo, do tipo havaiano e estromboliano e de natureza basáltica (*s.l.*), nomeadamente, associados aos sistemas vulcânicos do tipo fissural e a erupções explosivas subplinianas e hidromagmáticas, envolvendo magmas mais evoluídos, de composição traquítica (*s.l.*), associados aos vulcões centrais.

A edificação das ilhas Santa Maria, São Jorge e Pico, bem como de extensas áreas noutras ilhas, como o Faial e São Miguel, relaciona-se com atividade vulcânica havaiana e estromboliana. Assim, podem observar-se escoadas lávicas dos tipos *pahoehoe* e *aa*, de natureza basáltica (*s.l.*), assim como cones de escórias e de *spatter*, muitas vezes dispostos ao longo de alinhamentos tectónicos.

Nas outras ilhas, as rochas vulcânicas são quimicamente mais evoluídas, tendo um alcance de basaltos (*s.l.*) a traquitos (*s.l.*). De uma forma mais dispersa pelo Arquipélago, encontramos áreas cobertas de depósitos de queda - Púmice, ignimbritos e outros tipos de escoadas piroclásticas e domos traquíticos (*s.l.*) (Cruz *et al.*, 2011).

A região dos Açores é caracterizada por uma intensa atividade sísmica, centrada ao longo dos principais acidentes tectónicos ativos. Realça-se a existência de diversas zonas sismogénicas, que se evidenciam pela elevada sismicidade, como é o caso da zona: 1 - W do Faial; 2 - Fossa Oeste da Graciosa; 3 - Crista Submarina Leste da Terceira; 4 - Fossa Hirondelle; 5 - Zona Central de São Miguel; 6 - Fossa da Povoação; 7 - Região dos Ilhéus das Formigas (PGRH-Açores, 2012; Pacheco *et al.*, 2013).

A sismicidade é marcada por eventos no geral de magnitude intermédia a baixa, ocorrendo ocasionalmente eventos com magnitude superior a 5 (escala de *Ritcher*). Também são de assinalar as crises sísmicas de natureza Vulcano-tectónicas, associadas a erupção vulcânica ou à instalação de corpos magmáticos sub-superficiais (Pacheco *et al.*, 2013).

Nas zonas de Fratura Este e Oeste dos Açores a sismicidade é muito reduzida, ou nula quando comparada com os outros segmentos tectónicos. Nas ilhas do Grupo Ocidental, estando afastados das principais zonas sismogénicas, nota-se a ausência de eventos sísmicos.

2.5.3. Geologia e Geocronologia Insulares

Na **ilha de Santa Maria**, datada como a mais antiga dos Açores (Féraud, Kaneoka, & Allégre, 1980), são reconhecidas oito unidades litoestratigráficas, correspondendo a uma sequência de rochas vulcânicas de caráter explosivo e/ou efusivo, com intercalações de rochas sedimentares marinhas e terrestres (como calcários, arenitos, argilitos conglomerados, frequentemente com importante conteúdo fossilífero) em posições estratigráficas diversas (Pacheco *et al.*, 2013).

A geologia da ilha de **São Miguel** é dominada por seis complexos vulcânicos (Complexo Vulcânico do Nordeste, da Povoação, das Furnas, das Sete Cidades, do Fogo e dos Picos), sendo três destes são vulcões centrais ativos (Sete Cidades, Fogo, Furnas). As atividades dos aparelhos vulcânicos desta ilha apresentam uma diversidade de tipos de erupções: plinianas, subplinianas e hidrovulcânicas, estrombolianas, havaianas e surtseanas (França *et al.*, 2003). A composição magmática varia numa extensão de basaltos (*s.l.*) a traquitos (*s.l.*) (Larrea, França, Widom, & Lago, 2018).

No que concerne à geologia da **ilha Terceira**, é construída sobre quatro centros eruptivos principais distintos (Complexo Vulcânico da Serra do Cume; Complexo Vulcânico de Santa Bárbara; Complexo Vulcânico do Pico Alto; Zona Basáltica Fissural). A extensão da composição das lavas subaéreas e submarinas são de basaltos alcalinos (*s.l.*) a traquitos (*s.l.*). Esta ilha distingue-se das outras do Arquipélago pela notória abundância de domos lávicos e a grande lacuna composicional, com uma escassez de rochas na faixa benmoreítica - traquito (*s.l.*) nos vulcões Santa Bárbara e Pico Alto (Rodrigues, 2002; França *et al.*, 2003; Larrea *et al.*, 2018).

A ilha de **São Jorge** é dominada pelo vulcanismo fissural exclusivamente basáltico (*s.l.*) dos seus três complexos vulcânicos (Topo, Rosais e Manadas). A sua morfologia alongada e de elevada altitude é reconhecida como a cordilheira central dos Açores. Além do controlo tectónico regional exercido na configuração da ilha, são de realçar as muitas fajãs, detríticas e lávicas, existentes na base das altas falésias costeiras da ilha (França *et al.*, 2003; Pacheco *et al.*, 2013).

A ilha mais recente, apresenta rochas vulcânicas aflorantes predominantemente da série dos basaltos alcalinos (*s.l.*), o que contrasta com a tendência toleítica dos basaltos da CMA, embora nalgumas ilhas se possam observar alguns basaltos transicionais. A região ocidental da **ilha do Pico** destaca-se pelo imponente vulcão central basáltico, construído por uma sucessão de erupções de escoadas lávicas basálticas (*s.l.*), muito fluidas, intercaladas com depósitos piroclásticos da mesma natureza e menos importantes (França *et al.*, 2003).

A geologia da **ilha do Faial** é caracterizada pela existência de um vulcão central, com caldeira no topo da estrutura, que domina toda a região central e oriental da ilha, e a atividade

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

vulcânica explosiva recente originou a deposição de pedra-pomes de queda, *lahars* e escoadas piroclásticas. A extremidade W desta ilha é dominada pela erupção de escoadas lávicas basálticas (*s.l.*), bem como pela emissão de materiais piroclásticos a partir de cones de escórias, que se distribuem ao longo de fissuras eruptivas (Pacheco *et al.*, 2013).

O registo geológico da **ilha das Flores** consta de uma sucessão de episódios vulcânicos que produziram sucessões de sequências lávico-piroclásticas e depósitos vulcanoclásticos, cuja evolução foi marcada pelos percursos transgressivo e regressivo do nível das águas do mar e pela ocorrência de movimentos verticais do edifício insular. As formações vulcânicas estão organizadas, segundo critérios geocronológicos e vulcanológicos, em dois grupos, da mais antiga para a mais recente: Complexo de Base, que inclui as formações vulcânicas resultantes de atividade submarina e emergente; e o Complexo Superior, representado por escoadas lávicas subaéreas e depósitos piroclásticos (Azevedo, 1988 e 1998; Azevedo & Ferreira, 1998 e 2006).

A **ilha do Corvo** é denominada “ilha vulcão” por apresentar um único vulcão central, que contrasta com o pequeno delta lávico que domina a extremidade sul da ilha. Este apresenta uma importante diversidade de tipos de produtos vulcânicos, o que evidencia a existência de diferentes estilos de atividade no decurso da sua história eruptiva, nomeadamente, surtseano, havaiano/estromboliano e subpliniano (Pacheco *et al.*, 2013). As litologias variam entre basaltos (*s.l.*) e traquitos (*s.l.*) (França *et al.*, 2003).

3. Caracterização Física Insular

A ilha Graciosa é a mais setentrional das ilhas do Grupo Central do Arquipélago dos Açores pelo que este projeto de estudo sobre a hidrogeologia desta unidade insular merece uma apresentação física minuciosa local.

3.1. Caracterização Morfológica

A parte emersa do edifício insular da Graciosa, com uma área de 60,66 km² e um volume estimado de 7,4 km³, descreve uma configuração aproximadamente elíptica. Com uma orientação de NW-SE, a ilha tem um comprimento e uma largura máxima de 12 km e de 8 km, respetivamente (Fig. 3.1).

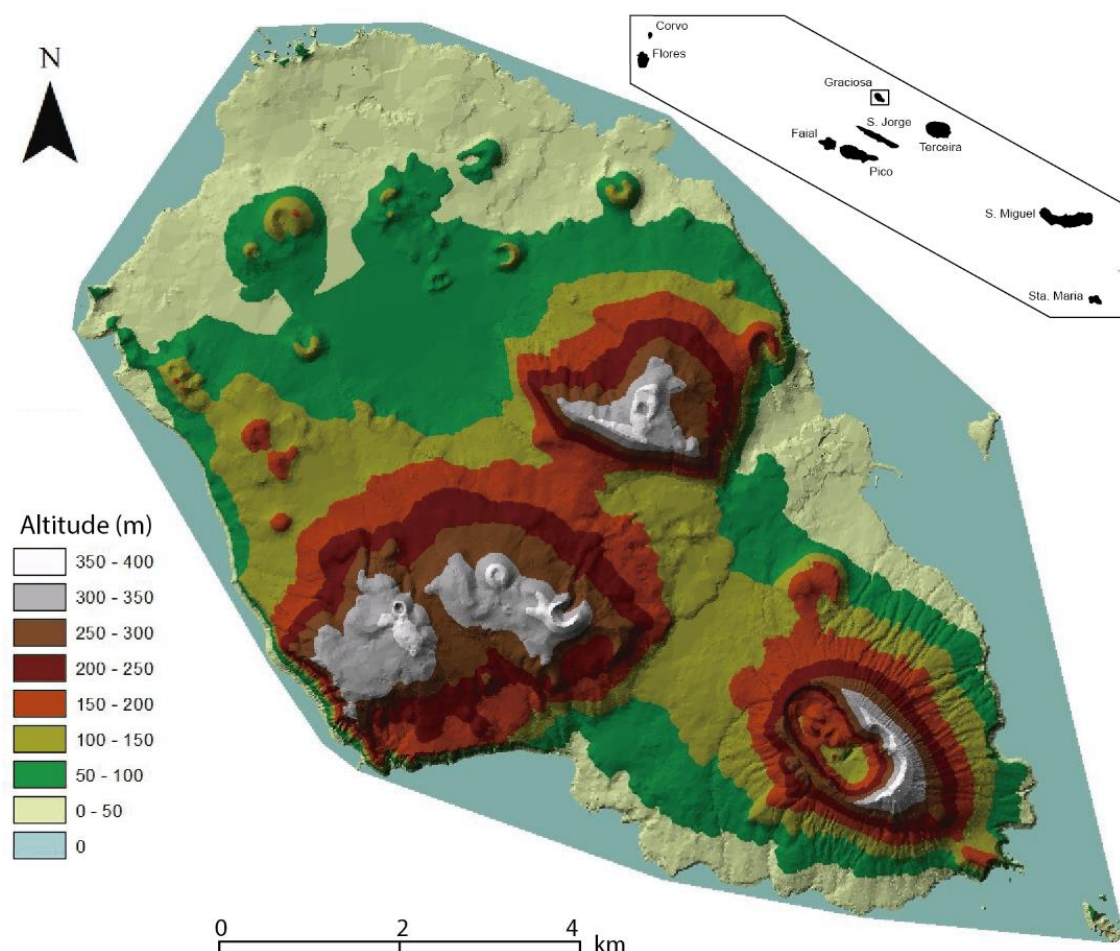


Figura 3.1: Modelo Digital de Terreno da ilha Graciosa.

A altitude máxima da Graciosa (402 m) é atingida no bordo Sudeste da Caldeira (Fig.3.1). Atendendo à distribuição altimétrica, verifica-se que cerca de 80% da superfície

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

insular apresenta cotas inferiores a 200 m e 14% situa-se entre 300 m e 400 m de altitude, estando os restantes 6% acima deste valor (PGRH-Açores, 2012).

A faixa costeira é genericamente caracterizada pela ocorrência de arribas baixas e numerosas baías. No entanto, a costa a NW da Serra Branca e a costa SE da Caldeira apresentam arribas mais elevadas que podem ultrapassar os 200 m de altitude.

A ilha apresenta 4 unidades geomorfológicas principais (Gaspar, 1996; França *et al.*, 2003; Antunes, 2008; Freire, 2013): (1) o Maciço da Caldeira; (2) a Serra das Fontes; (3) o Maciço Centro-Meridional; (4) e a Plataforma Noroeste.

(1) Maciço da Caldeira - Situado na parte sudeste da ilha, encontra-se separado das Serras das Fontes, Branca e Dormida por uma depressão com orientação geral NE-SW. Esta estrutura vulcânica apresenta uma forma alongada, segundo a direção NW-SE, existindo na sua parte superior uma caldeira dupla com forma oval. O bordo da Caldeira é dissimétrico, sendo mais alto na extremidade SE, com uma cota máxima de 402 m, enquanto na extremidade NW atinge apenas 250 m de altitude.

(2) Serra das Fontes - Está situada na região central da ilha e a NE das Serras Branca e Dormida. Tem uma configuração arredondada, atingindo a altitude máxima de 375 m. Dos aspetos peculiares destacam-se os seus abruptos flancos Sul e Este.

(3) Maciço Centro-Meridional - É constituído pelas Serras Branca e Dormida que estão separadas por uma pequena depressão com orientação NW-SE. A norte desta depressão encontra-se a Serra Dormida e apresenta no seu topo alguns cones com crateras, alinhados segundo uma direção NW-SE. A altitude máxima atinge-se no Pico do Timão (398 m) (SREA, 2017). Por sua vez, a Serra Branca, com uma cota máxima de 360 m, apresenta no flanco SW arribas costeiras escarpadas que alcançam uma altura considerável (150 m).

(4) Plataforma Noroeste - Desenvolve-se a baixa altitude, com cotas que rondam os 50 m, onde sobressaem, mais de 3 dezenas de cones de escórias, os maiores dos quais possuem vertentes declivosas. Destaca-se o Cabeço das Caldeiras cuja altitude máxima é de 181 m.

3.2. Caracterização Hidroclimatológica

A ilha Graciosa, como qualquer outra ilha, rege-se pelas características gerais descritas anteriormente (Cap. 2.) para o clima nos Açores, com base em Azevedo (2015). Tendo em consideração a sua localização mais setentrional, esta ilha está mais exposta às correntes provenientes do norte do Arquipélago. O relevo da ilha, sendo pouco acidentado, apresenta-se como uma condicionante física para a concentração de massas de água atmosféricas.

3.2.1. Precipitação e Temperatura Atmosférica

A ilha apresenta um dos mais baixos níveis de precipitação dos Açores, sendo esta concentrada no interior da ilha e um pouco pelas zonas de maior relevo (SREA, 2017).

Com base: (1) nos dados do relatório do PGRH-Açores (2012), para a ilha Graciosa (posto udométrico) referentes ao período de 1935 a 1960 (Tab. 3.1), e (2) nos resultados do modelo climático realizado por *Climate-Data*¹ (disponível *online*), efetuou-se o balanço hídrico sequencial e mensal ao nível do solo.

Tabela 3.1: Valores médios de precipitação (mm) medidos no posto udométrico (Latitude 38°05' N, Longitude 28°00' W; altitude de 30 m) referentes ao período 1935 a 1960 (Fonte: PGRH, 2001)

| Mês | out. | nov. | dez. | jan. | fev. | mar. | abr. | mai. | jun. | jul. | ago. | set. |
|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| (mm) | 88,8 | 90,6 | 98,0 | 122,3 | 100,5 | 109,6 | 59,9 | 56,4 | 43,9 | 36,2 | 39,2 | 73,0 |

O modelo de *Climate-Data* utiliza centenas de dados climáticos de todo o mundo, coletados entre 1982 e 2012.

Relativamente à ilha Graciosa, estão disponíveis os dados de precipitação média mensal e Temperatura média mensal (Tab. 3.2) dos seguintes pontos: Carapacho; Guadalupe; Luz; Praia; Santa Cruz da Graciosa e Vitória (Fig. 3.2).

¹ <https://pt.climate-data.org/>

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

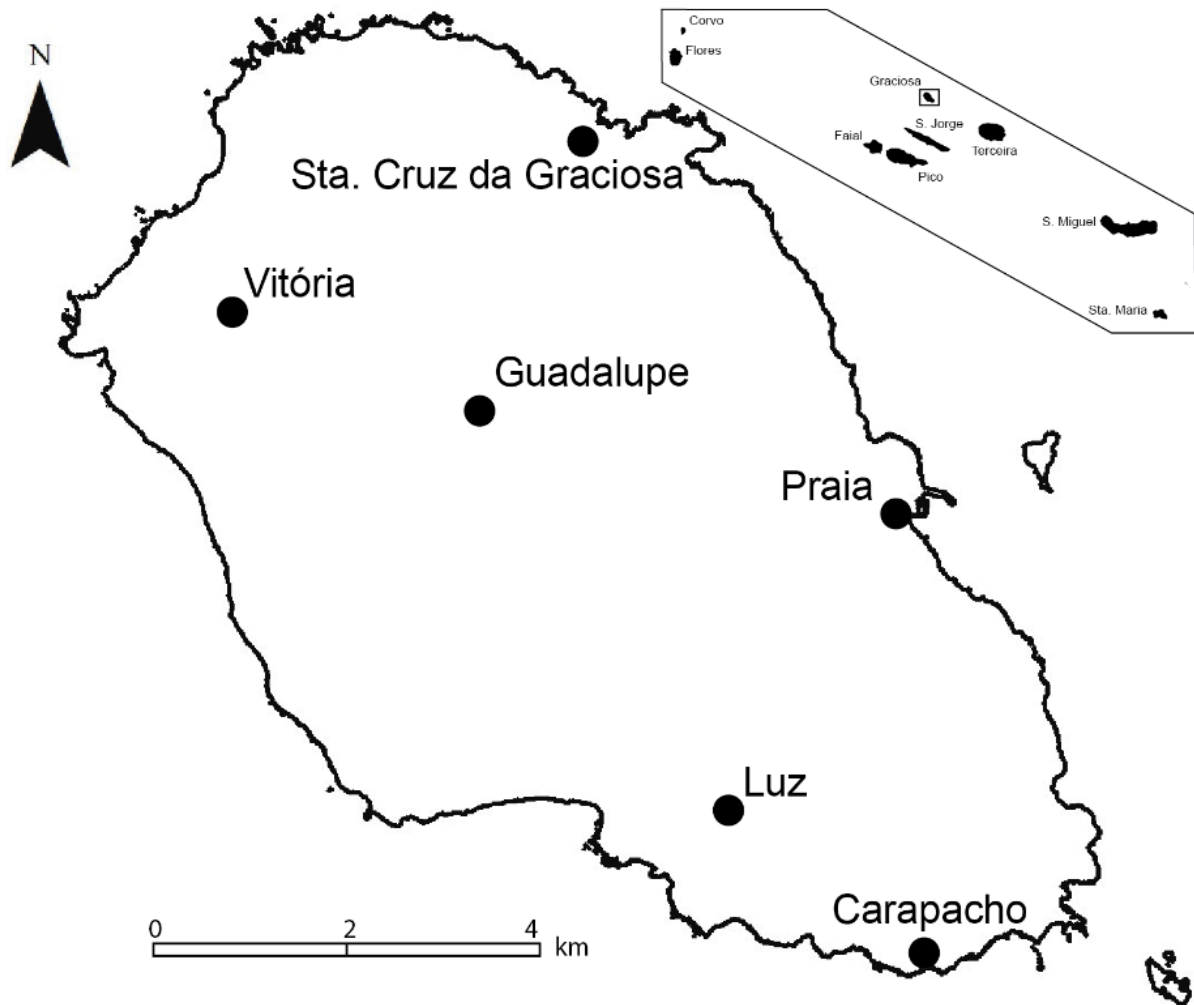


Figura 3.2: Localização dos pontos de recolha de dados climáticos pela Climate-Data, no período de 1982 a 2012 (Fonte: Climate-Data).

Os valores médios da temperatura e da precipitação média mensal da ilha, obtidos nas localidades e registados nos respetivos pontos udométricos, estão representados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Valores médios de precipitação (Prec.) e temperatura (Tmédia) disponíveis em Climate-Data.org (localização na figura 3.2) referentes ao período de 1982 a 2012 (Fonte: Climate-Data).

| | out. | nov. | dez. | jan. | fev. | mar. | abr. | mai. | jun. | jul. | ago. | set. |
|--------------------|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Localidade | Carapacho | | | | | | | | | | | |
| Tmédia (°C) | 18,7 | 16,3 | 15 | 14 | 13,5 | 13,9 | 14,7 | 16,3 | 18,4 | 20,7 | 21,9 | 21 |
| Prec. (mm) | 120 | 124 | 114 | 139 | 122 | 119 | 73 | 57 | 46 | 37 | 47 | 82 |
| Localidade | Guadalupe | | | | | | | | | | | |
| Tmédia (°C) | 18,1 | 15,8 | 14,3 | 13,4 | 12,9 | 13,3 | 14,1 | 15,7 | 18 | 20,2 | 21,3 | 20,4 |
| Prec. (mm) | 123 | 127 | 118 | 143 | 125 | 122 | 76 | 60 | 49 | 39 | 50 | 85 |
| Localidade | Luz | | | | | | | | | | | |
| Tmédia (°C) | 17,9 | 15,6 | 14,2 | 13,3 | 12,8 | 13,2 | 14 | 15,6 | 17,8 | 20,2 | 21,2 | 20,4 |
| Prec. (mm) | 123 | 128 | 118 | 143 | 125 | 123 | 77 | 60 | 49 | 39 | 50 | 85 |
| Localidade | Praia | | | | | | | | | | | |
| Tmédia (°C) | 18,9 | 16,7 | 15,2 | 14,2 | 13,7 | 14,2 | 15 | 16,5 | 18,6 | 20,9 | 22 | 21,2 |
| Prec. (mm) | 119 | 123 | 113 | 138 | 121 | 117 | 72 | 56 | 46 | 36 | 47 | 81 |
| Localidade | Santa Cruz da Graciosa | | | | | | | | | | | |
| Tmédia (°C) | 18,8 | 16,6 | 15,1 | 14,1 | 13,6 | 14,2 | 14,9 | 16,5 | 18,6 | 20,8 | 22,1 | 21,1 |
| Prec. (mm) | 120 | 124 | 114 | 138 | 121 | 117 | 73 | 57 | 46 | 37 | 47 | 82 |
| Localidade | Vitória | | | | | | | | | | | |
| Tmédia (°C) | 18,8 | 16,6 | 15,1 | 14,1 | 13,6 | 14,1 | 14,8 | 16,4 | 18,6 | 20,8 | 22,1 | 21,1 |
| Prec. (mm) | 119 | 123 | 114 | 137 | 120 | 116 | 72 | 57 | 47 | 37 | 48 | 83 |
| Média | out. | nov. | dez. | jan. | fev. | mar. | abr. | mai. | jun. | jul. | ago. | set. |
| Tmédia (°C) | 18,5 | 16,3 | 14,8 | 13,9 | 13,4 | 13,8 | 14,6 | 16,2 | 18,3 | 20,6 | 21,8 | 20,9 |
| Prec.. (mm) | 116,1 | 119,9 | 112,7 | 137,2 | 119,2 | 117,7 | 71,8 | 57,6 | 46,7 | 37,3 | 46,9 | 81,6 |

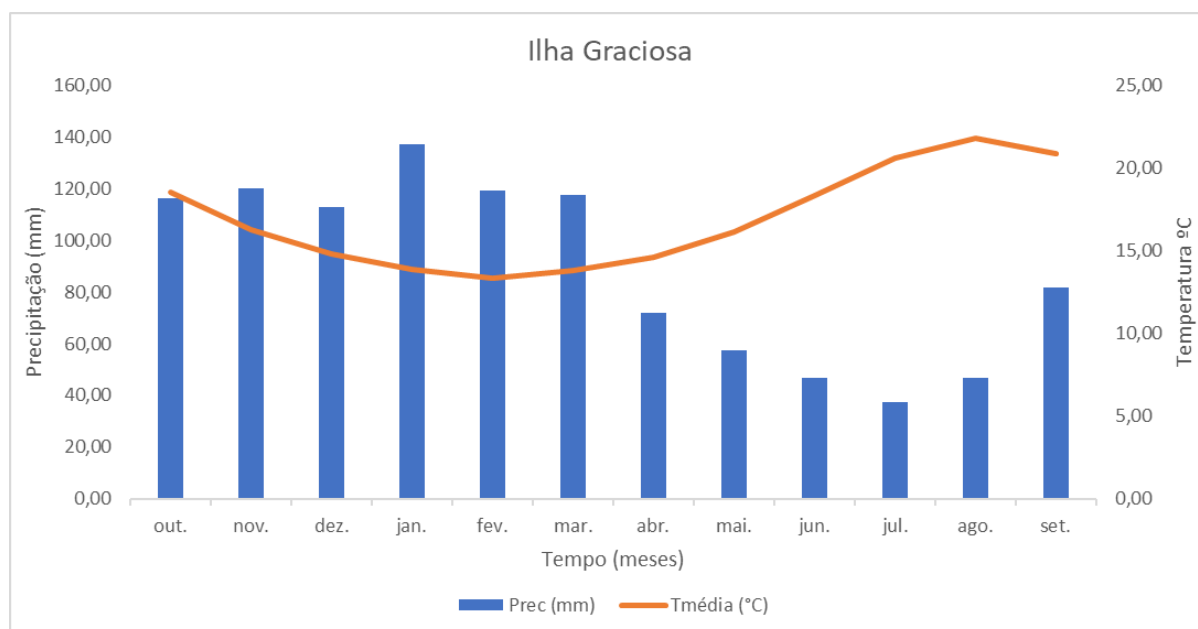


Figura 3.3: Gráfico dos valores médios de precipitação (mm) e temperatura (°C) dos postos udométricos da ilha Graciosa, no período de 1982 a 2012 (Fonte: Climate-Data).

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

Com base nestes dados (Fig. 3.3) determinou-se a temperatura média anual de 16,9 °C e a precipitação média anual de 88,7 mm. Interpretando os dados através do gráfico, verificamos que há um período seco de 6 meses e um período húmido de 6 meses. Relativamente à precipitação, o mês com menor valor é o mês de julho com 37,3 mm e janeiro com o valor mais elevado de 137,2 mm, sendo a precipitação total anual de 1064,8 mm. Relativamente à temperatura média, o mês com menor valor é o de fevereiro com 13,4 °C e agosto com o valor mais elevado de 21,7 °C.

Apesar da pequena dimensão da ilha e da reduzida distância entre pontos é de notar que as localidades costeiras (Praia, Carapacho e Santa Cruz da Graciosa) apresentam temperaturas um pouco superiores e valores de precipitação média inferiores às localidades mais interiores da ilha (Luz, Vitória e Guadalupe). No entanto, as variações destes dois parâmetros são semelhantes em toda a ilha.

3.2.2. Balanço Hídrico

Na realização deste balanço foram usados os valores das variáveis climáticas anteriormente descritas (Tab. 3.2). No cálculo da evapotranspiração potencial (ETP) foi utilizado o método de *Thornthwaite* (Pelton, King & Tanner, 1960). O balanço hídrico sequencial mensal ao nível do solo foi elaborado com base na metodologia de *Thornthwaite* (Tab. 3.3). Na indisponibilidade de um mapa detalhado das propriedades hidrológicas dos solos da zona, foi considerada uma capacidade de água utilizável no solo igual a 120 mm (máxima) e 0 mm (mínima).

Os parâmetros utilizados e calculados foram: a - função cúbica de I; DEF - défice hídrico; ETP - evapotranspiração potencial mensal; ETR - evapotranspiração real; EXC - excedente hídrico; Fc - fator de correção em função da latitude e mês do ano; I - índice térmico anual, correspondendo à soma de doze índices mensais; N - insolação astronómica média diária; P - precipitação; R - retenção hídrica no solo; T - temperatura; Tmi - temperatura média mensal.

As latitudes da origem dos dados climáticos são diferentes, sendo considerado a latitude de 39 graus para os cálculos do balanço hídrico, porque na média dos valores de precipitação contém 6 dos 7 valores calculados, tal como todos os dados de temperatura média. São também incluídos os dados do posto udométrico, pois são os valores considerados oficiais e incluídos no PGRH-Açores (2012).

Calculou-se a evapotranspiração potencial com o índice térmico anual (I) de 76,79 e a sua função cúbica (a) de 1,72 (Tab. 3.3), apresentando os resultados na tabela 3.4.

$$a = [6,75 \times 10^{-7} \cdot I^3] - [7,71 \times 10^{-5} \cdot I^2] + [0,01791 \cdot I] + 0,49239$$

Tabela 3.3: Valores da evapotranspiração potencial (ETP) para ilha da Graciosa, determinados pelo método de Thornthwaite. (P - precipitação; T - temperatura; N - insolação astronômica média diária; Fc - fator de correção em função da latitude e mês do ano; Tmi - temperatura média mensal).

| | out. | nov. | dez. | jan. | fev. | mar. | abr. | mai. | jun. | jul. | ago. | set. |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|
| P (mm) | 116,1 | 119,9 | 112,7 | 137,2 | 119,2 | 117,7 | 71,8 | 57,6 | 46,7 | 37,3 | 46,9 | 81,6 |
| T (°C) | 18,5 | 16,3 | 14,8 | 13,9 | 13,6 | 13,8 | 14,6 | 16,2 | 18,3 | 20,6 | 21,8 | 20,8 |
| N.º dias do mês | 31 | 30 | 31 | 31 | 28 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 | 31 | 30 |
| N | 10,9 | 9,8 | 9,3 | 9,6 | 10,5 | 11,7 | 13,1 | 14,1 | 14,7 | 14,4 | 13,5 | 12,2 |
| Fc | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,0 |
| Tmi | 7,3 | 6,0 | 5,2 | 4,7 | 4,4 | 4,7 | 5,1 | 5,9 | 7,2 | 8,5 | 9,3 | 8,7 |
| ETP | 68,5 | 47,4 | 39,7 | 36,4 | 33,9 | 44,3 | 52,4 | 69,9 | 87,5 | 108,3 | 111,2 | 90,7 |

Tabela 3.4: Resultados do balanço hídrico sequencial mensal para a ilha da Graciosa, determinados pelo método de Thornthwaite. (P - precipitação; Rs - retenção do solo; EXC - excedente hídrico; ETR - evapotranspiração real; DEF - déficit hídrico).

| | out. | nov. | dez. | jan. | fev. | mar. | abr. | mai. | jun. | jul. | ago. | set. |
|------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| P-ETP | 47,6 | 72,6 | 73,1 | 100,8 | 85,3 | 73,3 | 19,4 | -12,3 | -40,8 | -71,0 | -64,3 | -9,1 |
| Rs (k-1) +P-ETP | 47,6 | 120,2 | 193,1 | 220,8 | 205,3 | 193,3 | 139,4 | 107,7 | 66,9 | -4,1 | -64,3 | -9,1 |
| R solo | 47,6 | 120,0 | 120,0 | 120,0 | 120,0 | 120,0 | 120,0 | 107,7 | 66,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| EXC | 0,0 | 0,2 | 73,1 | 100,8 | 85,3 | 73,3 | 19,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| ETR | 68,5 | 47,4 | 39,7 | 36,4 | 33,9 | 44,3 | 52,4 | 69,9 | 87,5 | 104,2 | 46,9 | 81,6 |
| DEF | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 4,1 | 64,3 | 9,1 |

Com os dados obtidos na tabela 3.4 e na figura 3.4 é possível constatar que nos meses de outubro a abril a precipitação é superior à evapotranspiração ($P-ETP > 0$), verificando-se uma situação de disponibilidade hídrica no sistema, possibilitando a retenção hídrica ao nível do solo. Nos meses de maio a setembro, a precipitação é inferior à evapotranspiração ($P-ETP < 0$), verificando-se uma situação de carência hídrica no sistema, o que dificulta a retenção hídrica ao nível do solo.

Tendo em atenção que a capacidade máxima de retenção do solo é de 120 mm significa que quando a $P-ETP > 0$ ultrapassa estes valores há um excedente hídrico, como pode ser verificado na figura 3.4 nos meses de novembro a abril, com um total anual de 352,1 mm. Em janeiro esse valor atinge 100,8 mm, o que permite um excedente que possibilita a escorrência superficial. Enquanto que nos meses de julho a setembro com a $P-ETP < 0$ (Fig. 3.4), com os valores de retenção hídrica menores que zero (Tab. 3.4), verifica-se um déficit hídrico num total anual de 77,4 mm, sendo o mês de agosto o que apresenta um déficit mais acentuado de 64,3 mm.

Por fim, atendendo ao déficit hídrico é possível corrigir a evapotranspiração potencial e determinar a evapotranspiração real, porque não havendo água retida no solo, não haverá

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

consumos por parte das plantas ou evaporação para a atmosfera, logo a água disponível para a evapotranspiração será a que se precipita nesses meses como está representado na figura 3.5. Segundo os cálculos efetuados na tabela 3.4, a evapotranspiração real apresenta total anual de 712,7 mm, com o máximo de 104,2 mm no mês de julho e mínima de 33,9 mm em fevereiro.

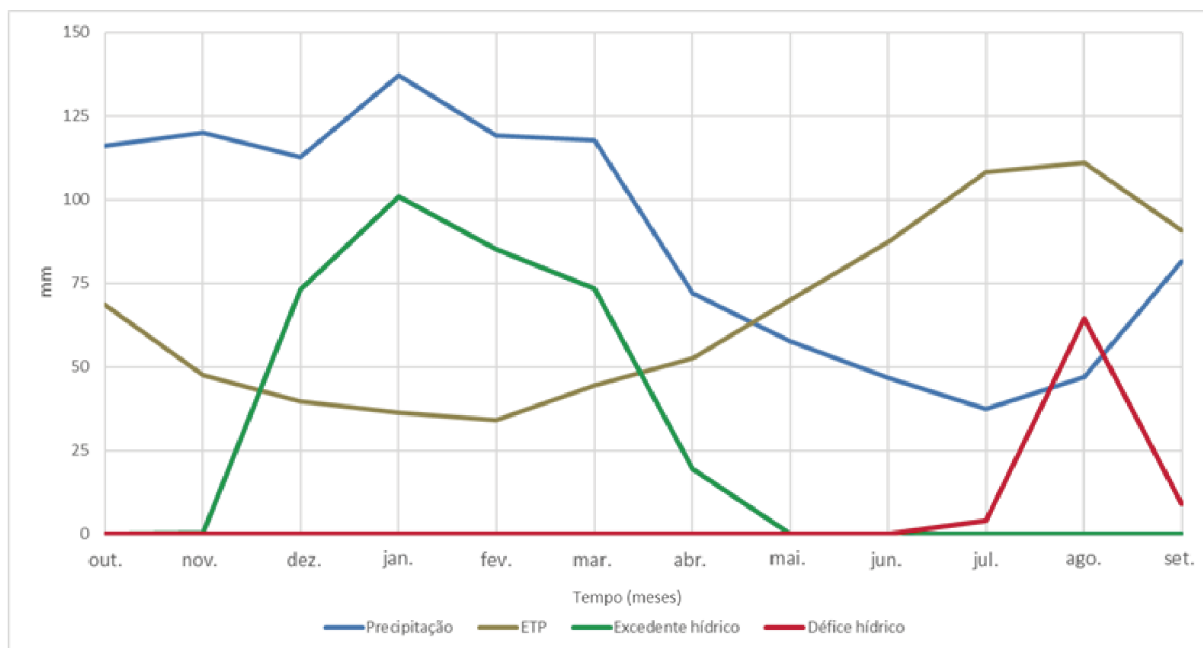


Figura 3.4 Gráfico com os resultados do balanço hídrico sequencial mensal para a ilha da Graciosa, determinados pelo método de Thornthwaite (ETP - Evapotranspiração).

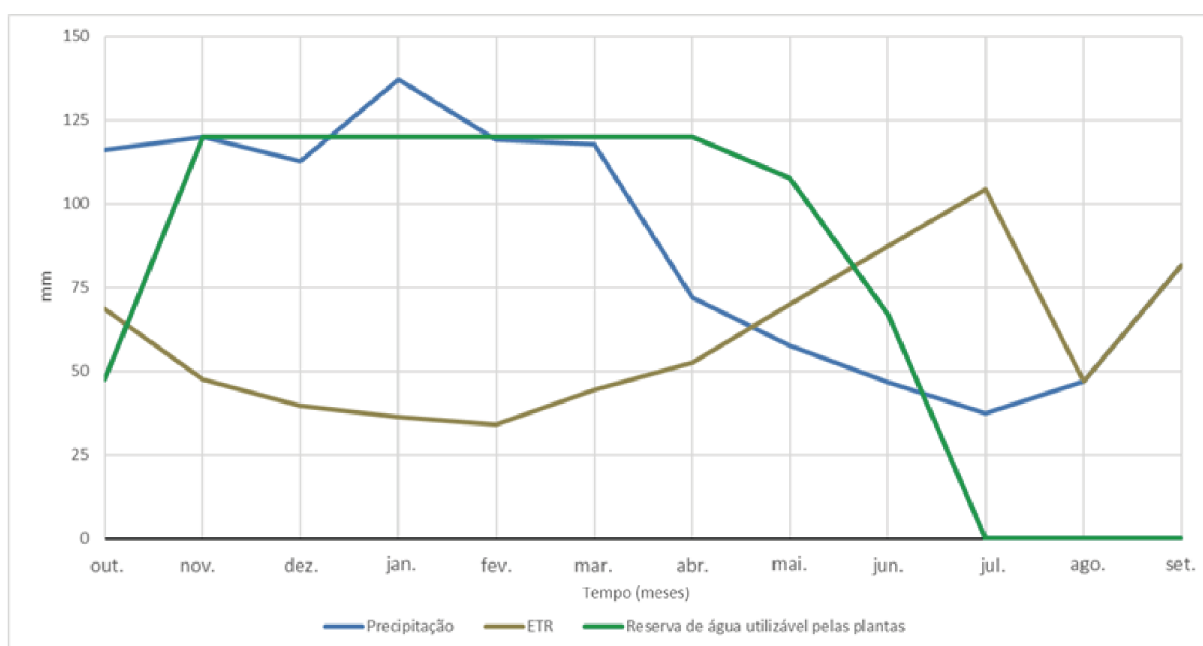


Figura 3.5: Gráfico com os resultados do balanço hídrico sequencial mensal para ilha da Graciosa, determinados pelo método de Thornthwaite com a correção na evapotranspiração real (ETR).

3.3. Caracterização Hidrográfica

Como consequência do baixo relevo da ilha, que não promove a precipitação orográfica, as bacias hidrográficas da ilha Graciosa são de pequena dimensão e jovens, ou seja, com fraco desenvolvimento e implantação dos cursos de água. Apresentam assim uma fraca estruturação da rede hidrográfica, a mais pobre de todas as ilhas dos Açores.

A rede hidrográfica nas zonas de maior relevo apresenta maior densidade, isto é, no Maciço da Caldeira e no Maciço Centro-Meridional. Na restante ilha a rede hidrográfica é incipiente e dispersa, com uma densidade de drenagem muito baixa (Fig.3.6).

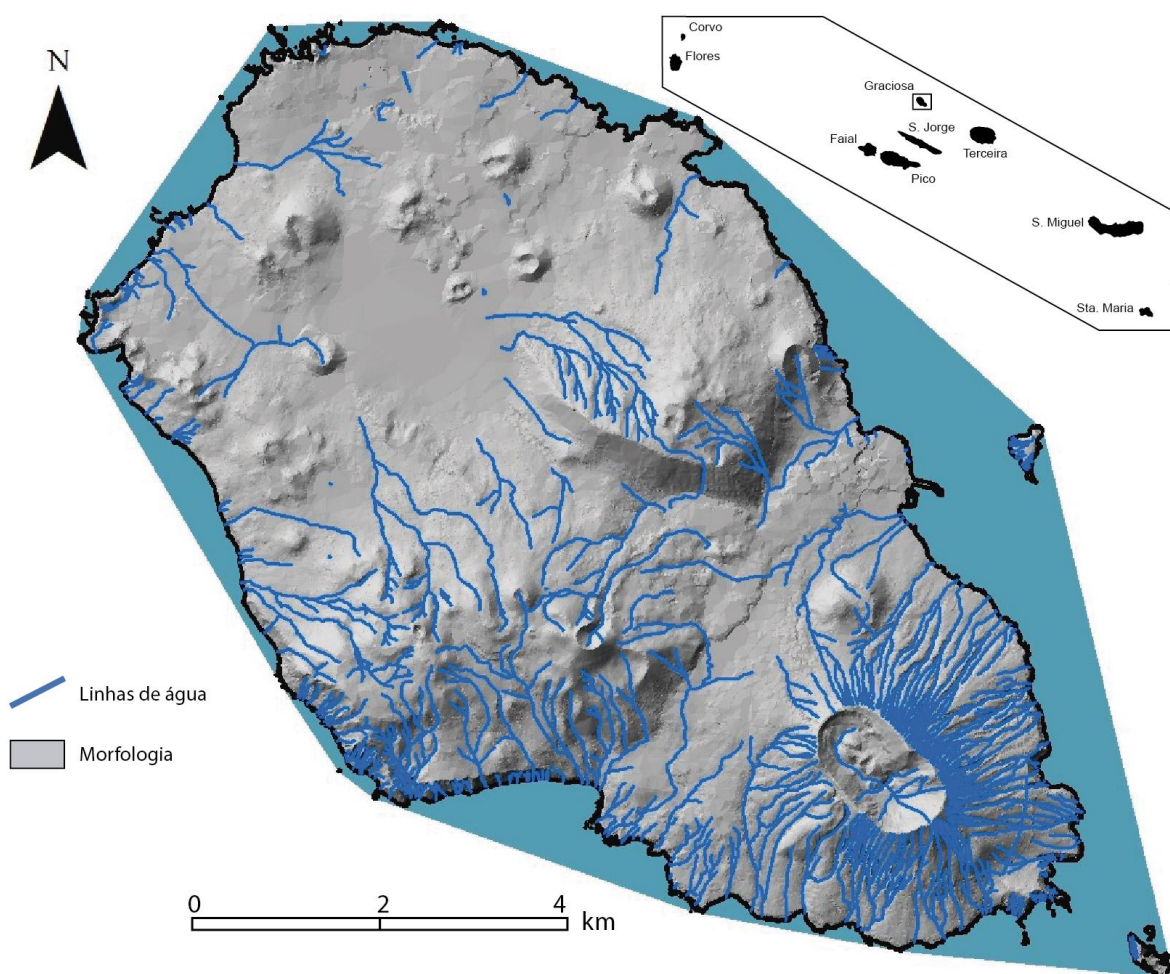


Figura 3.6: Rede hidrográfica da ilha Graciosa.

Tendo por base as principais Unidades geomorfológicas da ilha Graciosa, observa-se que a generalidade da Plataforma Noroeste é quase desprovida de cursos de água, pelo que a densidade de drenagem é praticamente nula (Fig. 3.6). Esta região apresenta um aglomerar de bacias endorreicas que desaguam no setor central da Plataforma.

Na Serra das Fontes, a drenagem superficial é bastante incipiente, mas com uma densidade de drenagem média nas zonas de maior altitude. Por sua vez, nas Serras Branca e Dormida, os cursos de água são mais desenvolvidos e melhor estruturados, definindo uma rede de drenagem com padrão radial. As bacias que drenam para o interior da ilha são endorreicas, enquanto as exorreicas vão drenar para o oceano Atlântico.

Por último, no Maciço da Caldeira, os cursos de água são numerosos, especialmente no flanco Nordeste, descrevendo padrão radial em torno desta estrutura vulcânica. Neste setor, a rede de drenagem superficial é bem marcada, apesar de pouco ramificada e com bacias hidrográficas de pequena dimensão (PGRH-Açores, 2012; França *et al.*, 2003). No interior da Caldeira encontra-se uma bacia endorreica pouco desenvolvida.

A hidrologia de superfície caracteriza-se, assim, por se desenvolver em pequenas bacias de drenagem muito heterogéneas e em que prevalece o regime de escoamento torrencial (PGRH-Açores, 2012).

3.4. Caracterização Tectónica

A ilha Graciosa está localizada no limite entre as Placas Euroasiática e Africana (Núbia), limite esse definido pelo Rifte da Terceira.

Hipólito, Madeira, Carmo *and* Gaspar (2011 e 2013) define dois sistemas principais de falhas na ilha Graciosa (Fig. 3.7):

- Sistema A: dominante e evidenciando uma maior expressão à superfície, desenvolve-se na direção NW-SE. Apresenta um comportamento normal, que inclui duas famílias de falhas inclinadas para NE e SW. Na parte central da ilha pode-se observar a notável expressão geomorfológica das escarpas de falha que definem a estrutura do *graben*. A SE é cruzado por uma escarpa de falha com orientação NNE-SSW que separa a unidade vulcânica mais antiga da mais recente. Apresenta um comportamento transtensivo, mergulhando para ESE.

- Sistema B: de menor expressão, com orientação NNE-SSW a NE-SW, com tendência a mergulhar WNW a NW, desligamento obliquo normal direito. O autor não relata a existência de famílias de falhas conjugadas.

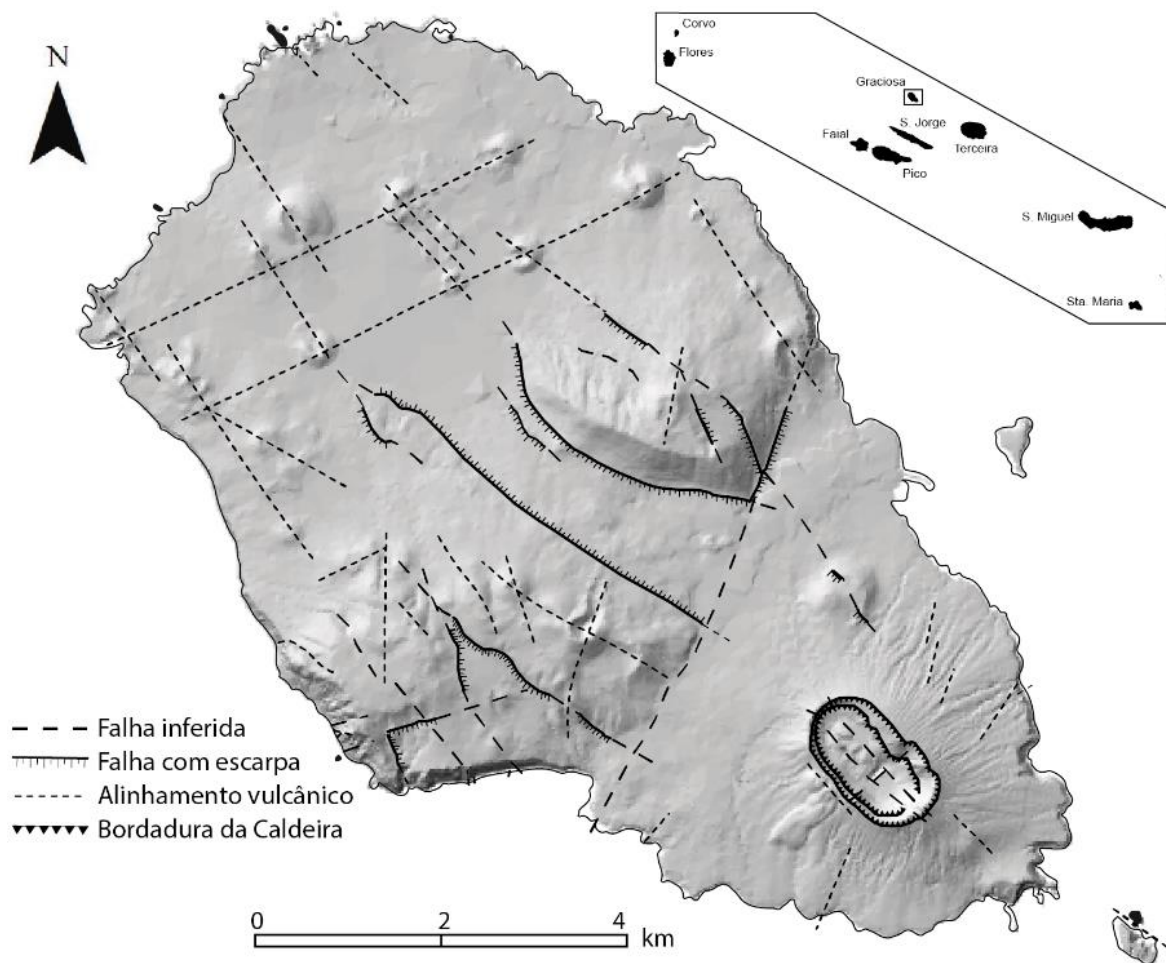


Figura 3.7: Carta morfo-tectónica da ilha Graciosa (adaptado de Hipólito *et al.*, 2013).

A ilha é ainda afetada por um vasto leque de acidentes tectónicos com orientações entre ENE-WSW e E-W, identificado pelo alinhamento vulcânico dos cones de escórias na plataforma NW da ilha, ou pela arribo a sul da Serra Branca (Gaspar, 1996; Hipólito, 2009, Hipólito *et al.*, 2010, 2011, 2013).

3.5. Caracterização Geológica

Segundo Gaspar (1996) o registo geológico da ilha Graciosa, consta de uma sucessão de produtos vulcânicos organizados em três Complexos Vulcânicos, do mais antigo para o mais recente: Complexo Vulcânico da Serra das Fontes; Complexo Vulcânico da Serra Branca; e o Complexo Vulcânico de Vitória - Vulcão Central.

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

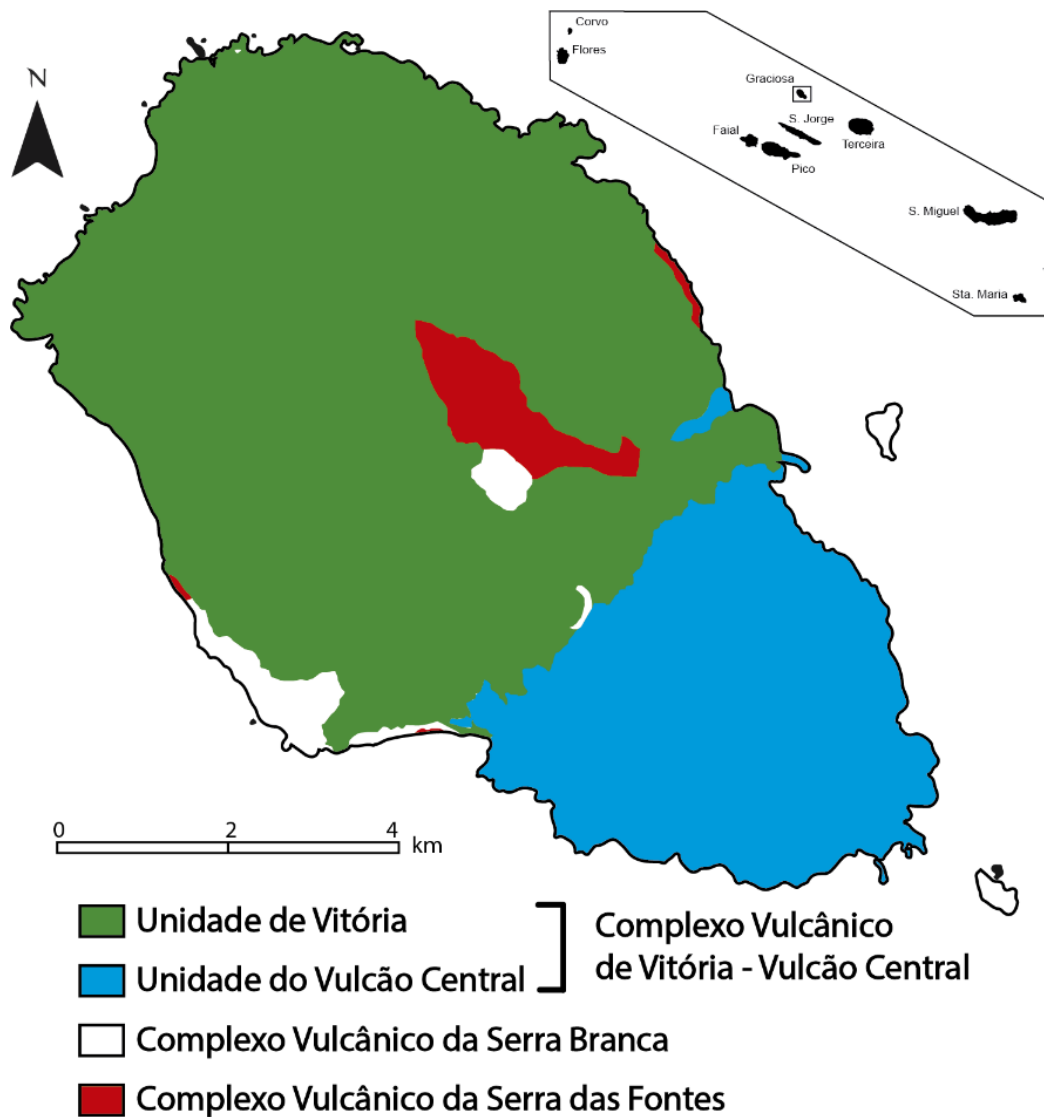


Figura 3.8: Carta Geológica Simplificada da ilha Graciosa (Adaptado de Gaspar & Queiroz, 1995).

3.5.1. Complexo Vulcânico da Serra das Fontes

Corresponde à unidade geológica mais antiga da ilha, com $10\,569\,000 \pm 280\,000$ anos (Larrea, 2014) (Fig. 3.18). Os seus principais afloramentos ocorrem na Serra das Fontes, sendo constituídos por uma sucessão de escoadas lávicas subaéreas de natureza basáltica (s.l.), normalmente ricas em fenocristais de plagioclase, e com alguma olivina (Fig. 3.9), intercaladas com depósitos vulcanoclásticos indiferenciados (Gaspar, 1996).

Os depósitos vulcanoclásticos são compostos por blocos e outros materiais vulcânicos de queda de granulometria diversa, que variam entre cinzas, escória e *lapilli*. Estes materiais apresentam uma estrutura moderada a fracamente consolidados, formando tufos líticos com escórias.

3.5.2. Complexo Vulcânico da Serra Branca

Este Complexo formado há cerca de $4\ 335\ 000 \pm 129\ 000$ anos (Larrea, 2014) (Fig. 3.18) ocupa a região SW da ilha. É constituído por dois Maciços: a Serra Branca e a Serra Dormida, separados por uma ligeira depressão NW-SE (Fig. 3.7).

De um modo geral, os produtos vulcânicos que integram esta unidade correspondem ao Maciço Centro-Meridional, que incluem espessas escoadas lávicas e numerosos depósitos vulcanoclásticos de natureza traquítica (*s.l.*). Nestes últimos, englobam-se depósitos de pedra-pomes de queda, depósitos de escoadas piroclásticas - ignimbritos e escoadas de blocos e cinzas - *surges* e, possivelmente, *lahars* (Gaspar, 1996).

No topo da sequência são comuns depósitos epiclásticos, nalguns casos extremamente compactados, formando brechas constituídas por depósitos de pedra-pomes ricas em fragmentos densos de natureza traquítica (*s.l.*) (Fig. 3.10).

Os produtos do Complexo Vulcânico da Serra Branca encontram-se geralmente cobertos por escoadas lávicas e piroclastos de formações mais recentes (Gaspar, 1996).

3.5.3. Complexo Vulcânico de Vitória

Este Complexo vulcânico localizado a SE da Graciosa, formou-se de acordo com Feraud *et al.*, (1979), há 160 000 anos, sendo o mais recente da ilha. Comporta duas Unidades distintas - Unidade de Vitória e a Unidade do Vulcão Central - que se formaram simultaneamente, diferenciando-se quanto ao enquadramento geológico e quanto ao tipo de atividade vulcânica predominante (Gaspar, 1996).

De acordo com Gaspar (1996), a análise dos diferentes depósitos destas unidades permite individualizar uma série de subunidades constituídas por depósitos de piroclastos submarinos e subaéreos de natureza basáltica (*s.l.*), designadamente escoadas lávicas subaéreas e submarinas (*s.l.*), depósitos pomíticos de queda, *lahars*, *surges* e escoadas piroclásticas. Ainda de acordo com este autor, o leque petrográfico desta unidade abrange uma sequência de termos litológicos que vão desde os basaltos (*s.l.*) aos traquitos (*s.l.*).

3.5.3.1. Unidade do Vulcão Central

A formação do Vulcão Central - Caldeira - divide-se em 3 períodos distintos: Pré-Caldeira, Formação da Caldeira e Pós-Caldeira (Fig. 3.18), que se subdividem, no seu conjunto, em 22 subunidades. Segundo Gaspar (1996), as formações que constituem esta unidade variam entre os materiais de natureza basáltica (*s.l.*) e a traquítica (*s.l.*). Os seus

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

produtos vulcânicos oscilam entre: escoadas lávicas; piroclastos basálticos (s.l.); pedra-pomes traquítica (s.l.); depósito de cinzas; *lahars*; e *surges*.

O primeiro período de formação - Pré-Caldeira - corresponde aos materiais que integra a base do estratovulcão da Caldeira, que incluem escoadas lávicas e depósitos vulcanoclásticos emitidos por diferentes centros eruptivos, testemunhando uma primitiva atividade surtseana e estromboliana (Gaspar, 1996). Os primeiros materiais emitidos, de natureza basáltica (s.l.), resultam da atividade surtseana e formam tufos amarelo-acastanhados, palagonitizados (Fig. 3.11).

Os depósitos hidromagmáticos, resultam da atividade explosiva característica da interação da água com a lava. Formam acumulações de materiais que apresentam uma granulometria variada com estratificação paralela, por vezes intercaladas com depósitos em *surges*. Estes apresentam uma alternância de depósitos de cinzas com níveis de *lapilli*, normalmente densos, e com alguns líticos. O fim deste período de formação é marcado no limite superior destes depósitos por uma importante superfície de erosão, caracterizada por um solo espesso.

As formações que correspondem à formação da Caldeira, sobrepostas aos materiais anteriormente referidos, englobam uma sucessão de três escoadas lávicas basálticas (s.l.) do tipo *aa* e *pahoehoe* intercaladas com depósitos piroclastos subaéreos, nomeadamente *lapilli* textura escoriácea, uns de natureza basáltica (s.l.) e outros traquítica (s.l.). Entre estes últimos depósitos, há evidências de acumulações de materiais vulcanoclásticos indiferenciados.

No final da Formação da Caldeira foram emitidas outras escoadas lávicas do tipo *aa*, caracterizadas pela elevada percentagem de xenólitos gabroicos que, por vezes, apresenta intercalados níveis de cinzas ou tufos com estrutura de *surges*.

Após a Formação da Caldeira, iniciou-se um período denominado Pós-Caldeira (Gaspar, 1996) que emitiu numa primeira fase escoadas piroclásticas (*lahars*) e piroclastos de queda (pedra-pomes e cinzas hidromagmáticas) (Fig.3.14). Estes cobrem a maior parte da superfície do Vulcão central, apresentando-se ricos em xenólitos sieníticos e muito compactos.

Gaspar, (1996) associa a este período a emissão de escoadas lávicas *pahoehoe* de natureza basáltica (s.l.) localizadas a W e NW da Caldeira, formadas como resultado da atividade de um lago de lava intracaldeira. Estas escoadas apresentam tubos lávicos perto do centro emissor (Fig. 3.15).

Na fase eruptiva final formaram-se domos de natureza benmoreítica, a SW da Caldeira e foram emitidos depósitos freatomagmáticos. Estes últimos localizados no interior da Caldeira, são constituídos por uma alternância de cinzas e *lapilli* englobados por uma significativa quantidade de líticos, de entre os quais se destacam blocos basálticos (s.l.) e xenólitos gabroicos.

3.5.3.2. Unidade de Vitória

Esta unidade é formada por piroclastos e escoadas lávicas de natureza basáltica (*s.l.*) que constituem a Plataforma NW e cobrem parcialmente a Serra das Fontes e o Maciço Centro-Meridional. Do ponto de vista vulcanológico reflete uma atividade essencialmente efusiva ou moderadamente explosiva responsável pela presença de inúmeros cones de escórias. Na orla costeira da ilha, ocorreram depósitos de piroclastos associados à atividade vulcânica submarina (Gaspar, 1996).

De um modo geral, as escoadas lávicas são do tipo *aa* e *pahoehoe* e exibem uma textura vesicular ocorrendo, por vezes, intercaladas com depósitos detríticos indiferenciados. Os depósitos piroclásticos ocorrem sob a forma de cones vulcânicos dispersos na Plataforma NW (Fig. 3.16).

Parte destas formações englobam as lavas e piroclastos mais recentes da ilha Graciosa, nomeadamente as escoadas lávicas do pico Timão - com idade inferior a 10 000 anos (Gaspar, 1996 e Larrea, 2014).

3.5.4. Depósitos de Vertente

Estes materiais incluem brechas e depósitos Vulcano-sedimentares que se dispõem na base de zonas geomorfologicamente acidentadas. Assumem especial realce os depósitos localizados na região central da ilha, onde convergem os produtos que resultam da desagregação das rochas da Serra das Fontes e Maciço Centro-Meridional.

3.5.5. Paleossolos

Foram identificados vários paleossolos na ilha Graciosa que afloram em algumas arribas costeiras, junto às nascentes e são intercetados por alguns furos. Estas formações correspondem a 2 períodos de acalmia vulcânica distintos: um entre os 270000 e os 160000 anos; e outro, mais recente formado provavelmente entre 90000 e 70000 anos (Tab. 3.18). Estas formações paleo-pedológicas são de natureza argilosa, e apresentam-se compactas e com aureolas castanho-avermelhadas de metamorfização térmica associadas a fenómenos de “cozimento” (Fig. 3.17).

Estas intercalações horizontais ou sub-horizontais estão provavelmente muito fraturadas, dada a intensa atividade tectónica dos Maciços onde ocorrem.

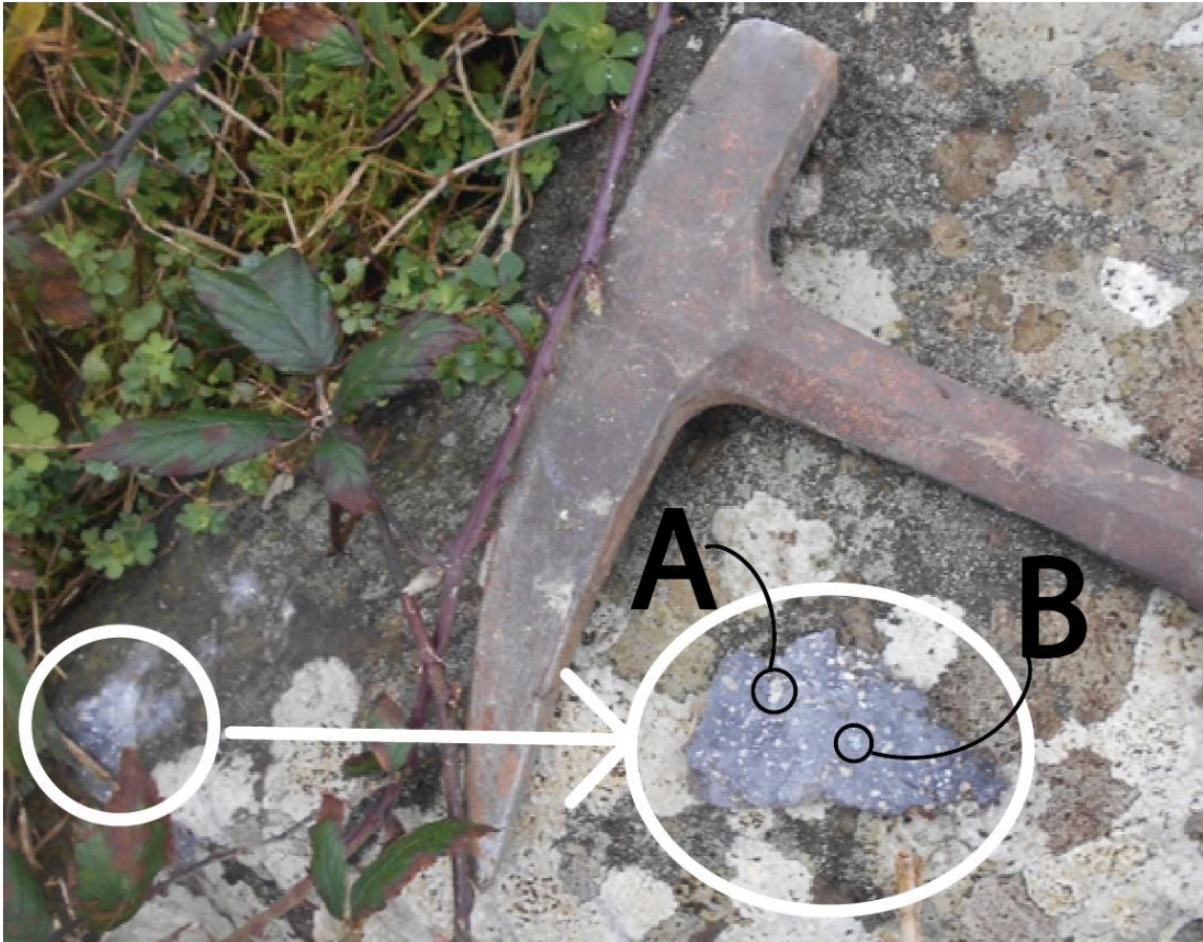


Figura 3.9: Rocha de natureza basáltica (s.l.) do complexo da Serra das Fontes, apresenta elevada compactidade e elevada alteração superficial. (A - Textura vesicular preenchida devido à alteração da rocha; B - Fenocristais de Plagioclase).



Figura 3.10: Brechas constituídas por depósitos de pedra-pomes ricos em fragmentos densos de natureza traquítica (s.l.).



Figura 3.11: Materiais vulcaniclásticos de natureza basáltica (s.l.) que formam tufo amarelo-acastanhados, palagonitizados.



Figura 3.12: Depósitos hidromagmáticos, apresentando alternância de depósitos de cinzas (3.) com níveis de lapilli (2.), normalmente densos, e com alguns líticos (1.). Alguns dos níveis encontram-se parcialmente palagonitizados (4.).

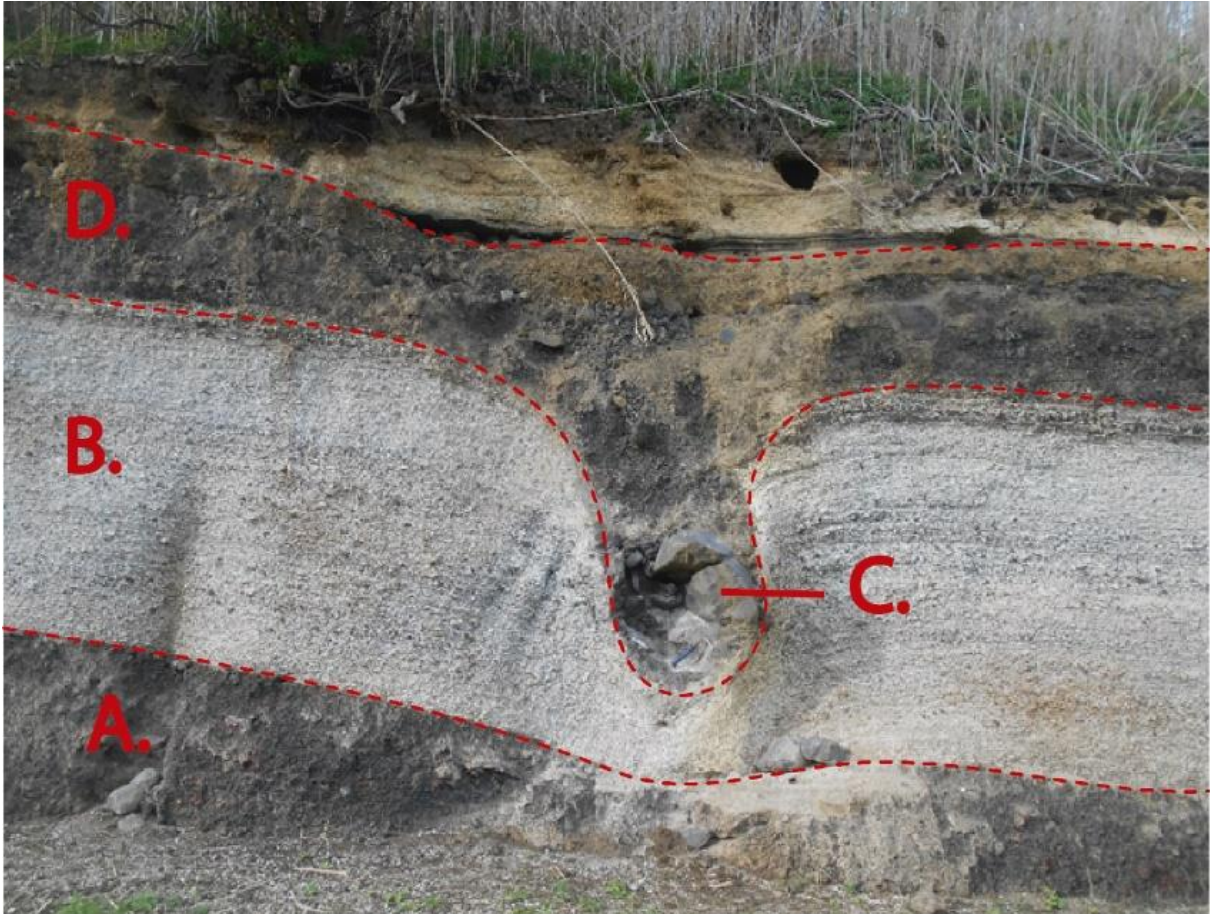


Figura 3.13: Intercalações de depósitos piroclastos subaéreos, nomeadamente lapilli com textura escoriácea, uns de natureza basáltica (s.l.) (A.) e outros traquítica (s.l.) (B.). Entre estes depósitos há evidências de acumulações de materiais vulcaniclásticos indiferenciados (C. - Bomba vulcânica e D.).



Figura 3.14: Afloramento que evidencia a intercalação de escoadas piroclásticas (lahars - 1.), piroclastos de queda (2.) e cinzas hidromagmáticas (3.).



Figura 3.15: Tubos lávicos, de grandes dimensões, nas vertentes da Caldeira.

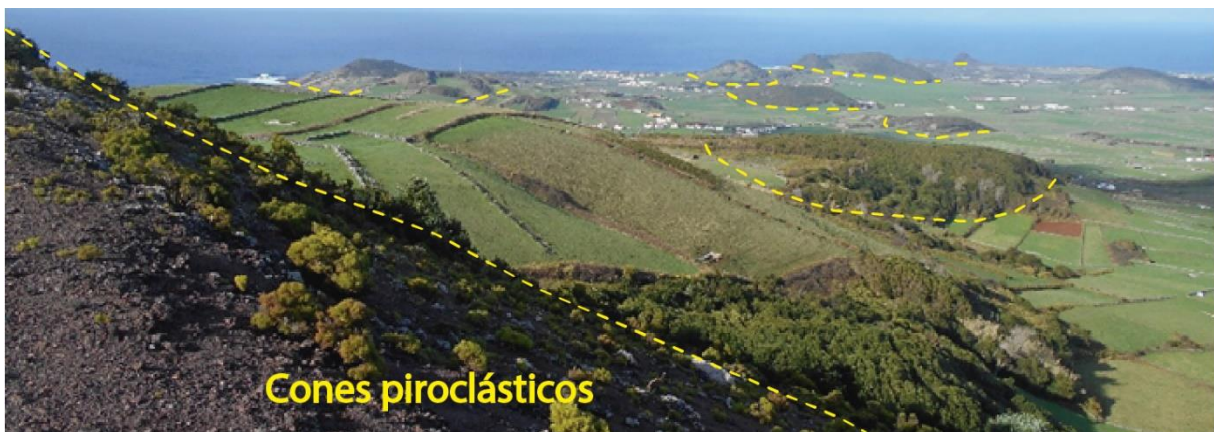


Figura 3.16: Depósitos piroclásticos que ocorrem sob a forma de cones vulcânicos, dispersos na Plataforma NW.

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS



Figura 3.17: Afloramento do estrato de paleossolo no extremo SE da ilha Graciosa.

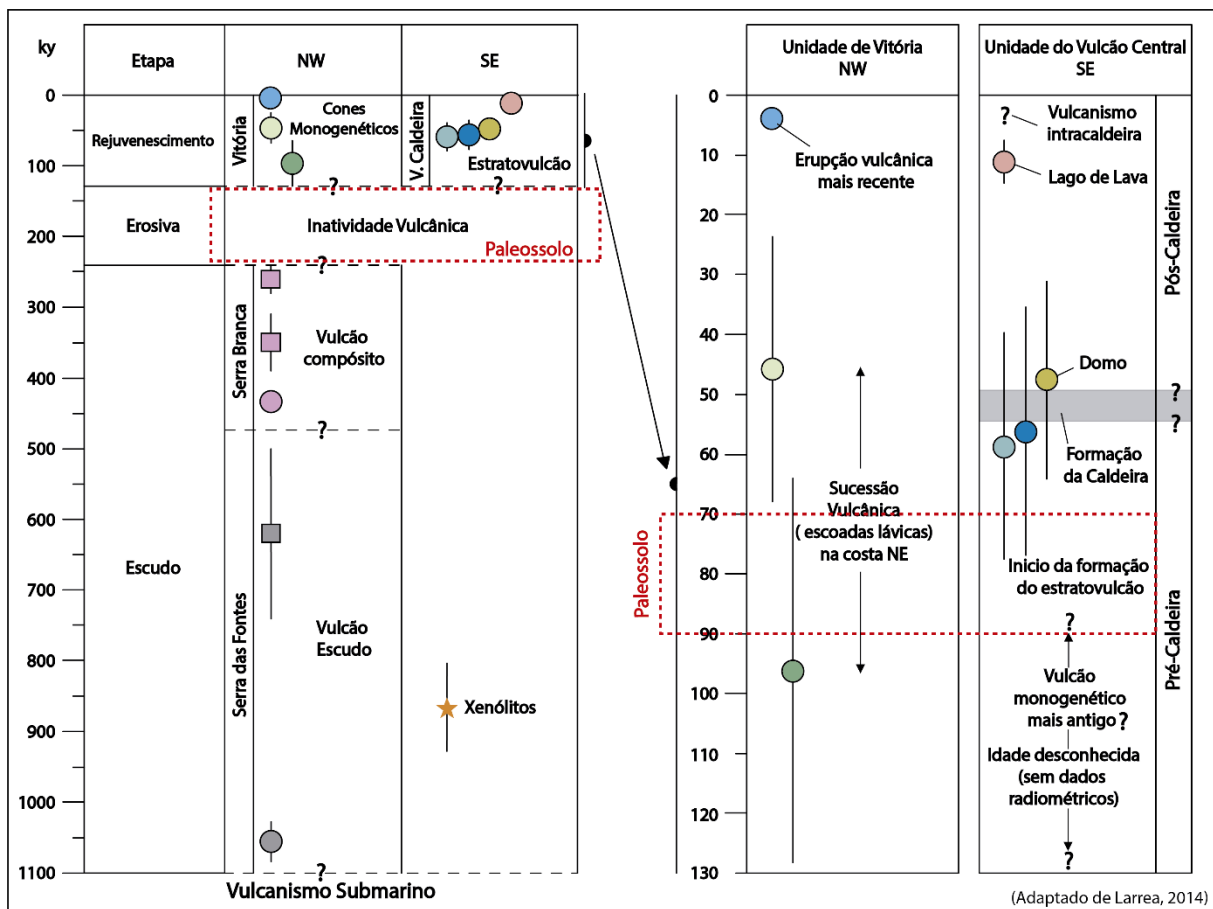


Figura 3.18: Tabela Cronoestratigráfica do vulcanismo da ilha Graciosa. Os Círculos e estrela representam a datação $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ do estudo de Larrea (2014), os quadrados representam as datações K/Ar do estudo de Feraud et al. (1980) (adaptado de Larrea, 2014).

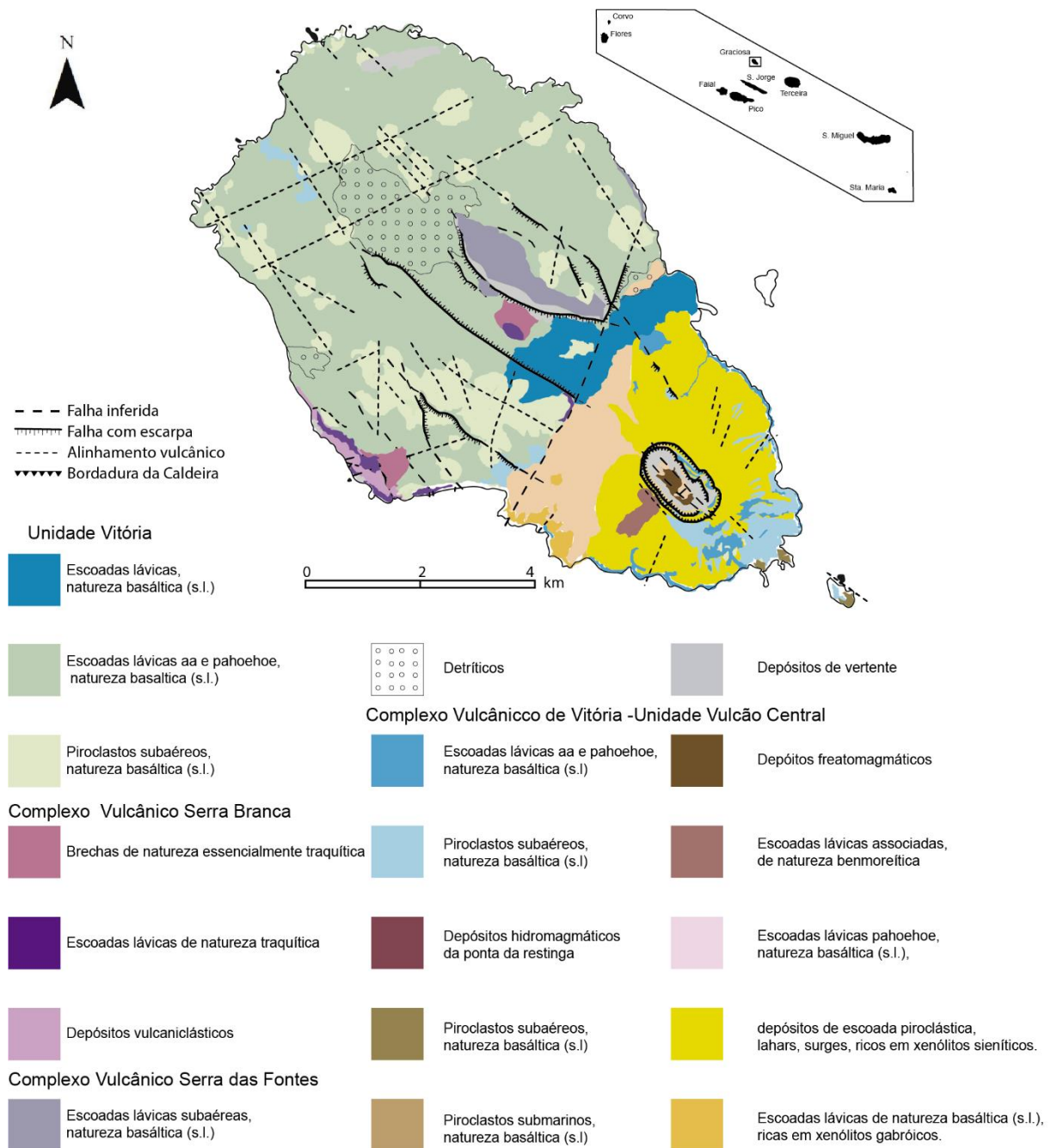


Figura 3.19: Carta Vulcano-estratigráfica com os elementos tectónicos (adaptado de Gaspar & Queiroz, 1995 e Hipólito, 2009).

3.6. Caracterização Sísmico-Vulcânica

A atividade sísmica com epicentro no edifício vulcânico da ilha Graciosa tem sido escassa e de baixa magnitude. As zonas sismogénicas geradoras dos sismos de maior magnitude têm correspondido às estruturas vulcano-tectónicas submarinas definidas pelas bacias W e E da ilha Graciosa. Também a norte e sul da ilha se tem observado alguma atividade sísmica.

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

O vulcanismo secundário na ilha Graciosa encontra-se representado pelas nascentes termais do Carapacho e da Baía dos Homiziados, localizadas na extremidade SE da ilha, e algumas emanações gasosas. O principal campo de desgaseificação situa-se no Vulcão da Caldeira da Graciosa, no interior da Furna do Enxofre, onde se destaca a existência de uma fumarola e de uma intensa desgaseificação difusa, libertando H₂O, CO₂ e outros gases menores (H₂S, H₂, CH₄ e N₂) (Larrea, 2014). São igualmente conhecidas algumas emissões de vapor permanentes na zona da Plataforma NW.

3.7. Uso e Ocupação do Solo

A superfície aflorante da ilha Graciosa é claramente dominada pela agricultura e pelas pastagens, atingindo o valor mais elevado do Arquipélago dos Açores, com cerca de 79% (Fig. 3.20). Já a área ocupada por vegetação natural é praticamente inexistente, representando o valor mais baixo da Região, com 0,4%. A sua ocupação florestal também apresenta um valor abaixo da média regional, com cerca de 12%. Nesta ilha salienta-se, ainda, a inexistência de lagoas (DROTRH, 2001).

Percentagem de ocupação do solo na ilha Graciosa

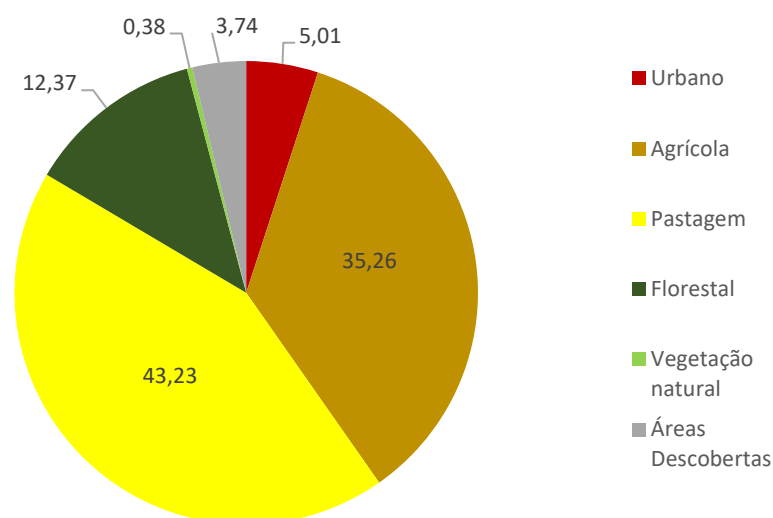


Figura 3.20: Ocupação dos solos da ilha Graciosa na sua área aflorante, em percentagem.

Quanto à distribuição espacial da ocupação do solo, com base na figura 3.21, verificamos que as áreas agrícolas se concentram maioritariamente na Plataforma NW da ilha, sendo o Maciço Centro-Meridional, a Serra das Fontes e as vertentes externas da Caldeira dominadas pela ocupação de pastagens. A ocupação florestal ocorre nas regiões com vertentes cujas inclinações são acentuadas, como as vertentes SW e SE da Serra das Fontes,

nas vertentes internas da Caldeira e na arriba costeira a SW da Serra Branca. Também ocupa alguns cones de escórias de maiores dimensões, assim como áreas de escoadas lávicas mais recentes. As áreas urbanas não apresentam áreas extensas à exceção da região Norte da ilha, onde se encontra o aeroporto e a vila de Santa Cruz da Graciosa. As restantes localidades estão mais ou menos afastadas, algumas até seguem a organização das redes de comunicação, que envolve praticamente toda a ilha. As áreas descobertas são basicamente toda a orla costeira (Fig. 3.21).

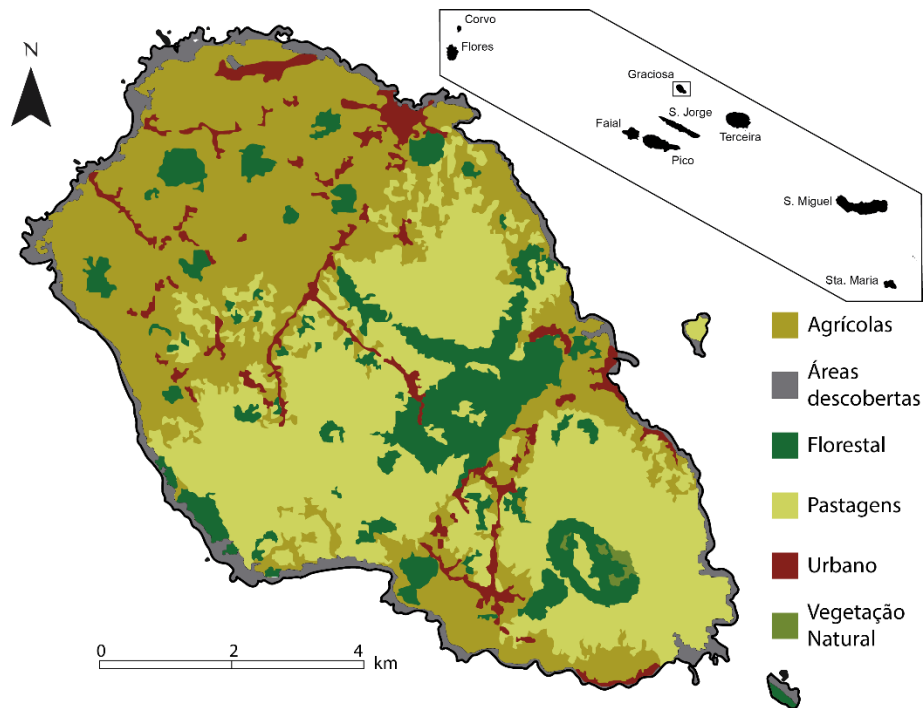


Figura 3.21: Carta de uso e ocupação dos solos na ilha Graciosa (adaptado de DROTRH, 2001).

De acordo com a tipologia e distribuição espacial do uso e ocupação dos solos na ilha em estudo, é expectável que as principais fontes potencialmente contaminantes de água sejam as atividades agrícolas e pecuárias. Contudo, deverão ser ainda consideradas as atividades urbanas e industriais, nomeadamente a presença de fossas sépticas e a circulação rodoviária.

4. Hidrogeologia da Ilha Graciosa

Neste Capítulo apresenta-se a caracterização hidrogeológica do domínio em estudo - ilha Graciosa. Esta caracterização baseou-se fundamentalmente nos dados de campo realizados em dezembro de 2018, levando a cabo o levantamento dos dados necessários e a recolha de amostras para análise laboratorial. Baseou-se também nos trabalhos publicados com as temáticas da tectónica, vulcanismo, geologia e hidrogeologia da ilha.

Segundo o autor Santamarta *et al.* (2014), as estruturas que, do ponto de vista hidrogeológico, se identificam como as mais relevantes são: O complexo de base ou a base da ilha; diques; paleossolos; grandes deslizamentos de terra; e depósitos de cinzas. Estas têm um comportamento impermeável responsáveis pela formação de massas de água. As formações rochosas, como as escoadas lávicas e os depósitos piroclásticos de queda, apresentam permeabilidades elevadas, permitindo, assim, o armazenando e a circulação das águas subterrâneas.

O meio vulcânico revela um elevado grau de compartimentação dos sistemas aquíferos, responsável pela ocorrência de dois tipos de sistemas aquíferos distintos: um basal e outros suspensos.

O sistema aquífero basal é limitado perifericamente pelo mar, correspondendo a uma lentícula de água doce que sobrenada água salgada mais densa proveniente de infiltrações do mar, o que implica um constrangimento sobre a exploração dos aquíferos e um significativo impacto sobre a qualidade dos recursos (Rodrigues, 2002; França *et al.*, 2003; Freire, 2013).

Os aquíferos suspensos surgem associados a níveis pouco permeáveis (ex.: paleossolos). Dependendo das características do terreno, estas formações hidrogeológicas podem ser múltiplas no mesmo Maciço, ocorrendo de forma sobreposta. A captação de água nestes aquíferos faz-se, maioritariamente, através de nascentes ou, nalguns casos, por furos (Freire, 2013).

A distribuição das nascentes no Arquipélago patenteia uma grande heterogeneidade, o que reflete o comportamento hidrogeológico do meio vulcânico, bem como os contrastes geomorfológicos e climáticos existentes (França *et al.*, 2003).

Em condições topográficas favoráveis, os aquíferos suspensos descarregam pelas nascentes localizadas nas vertentes dos grandes aparelhos vulcânicos, nomeadamente em escarpas de falha, arribas costeiras, tubos de lava e, sobretudo, nos talwegues dos cursos de água. A descarga das nascentes, relacionadas com os aquíferos basais, são submarinas ou ocorrem na zona intertidal e em pauis. O caudal das nascentes associadas aos aquíferos suspensos é normalmente baixo e comporta variações sazonais muito acentuadas (Rodrigues, 2002; Freire, 2013).

4.1. Pontos de Água Estudados

Para o estudo hidrogeológico da ilha efetuou-se o levantamento dos diversos pontos - nascentes, poços e furos. Assim foram identificados: 6 poços (P); 23 nascentes (N); 17 Furos (F). Na figura 4.1 está representada a distribuição destes pontos de água na ilha Graciosa.

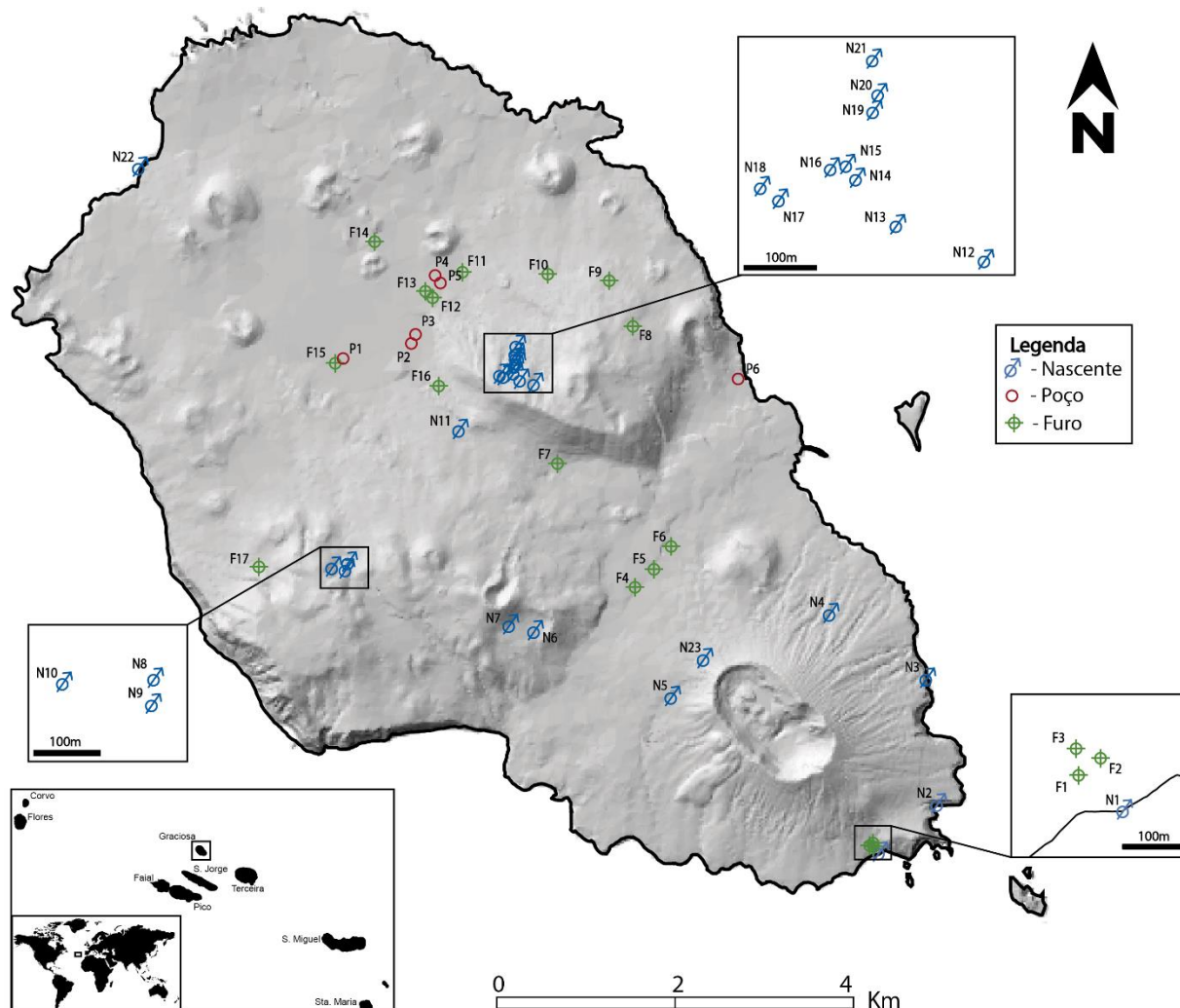


Figura 4.1: Distribuição geográfica dos pontos de água inventariados na ilha Graciosa. 17 Furos, 23 Nascentes e 6 poços.

4.1.1. Nascentes

Uma nascente é um ponto na superfície de descarga de água subterrânea, nomeadamente num local onde o nível piezométrico intersecta a superfície do solo. Estas descargas poderão ser de sistemas aquíferos basais ou suspensos, confinados ou não-confinados.

Na ilha Graciosa foram identificadas 23 nascentes (Tab. 4.1). Os elementos referentes a quatro destas (N2, N4, N22 e N23) foram retirados da bibliografia (PRA, 2001 e Gaspar,

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

1996) e as restantes foram localizadas no decurso dos trabalhos de campo. Distribuem-se pelas Unidades geomorfológicas insulares da seguinte forma (Fig. 4.2):

- 5 Localizam-se no Maciço da Caldeira (N1 a N5 e N23);
- 11 Na Serra das Fontes (N11 a N21);
- 5 Localizam-se no Maciço Centro-Meridional (N6 a N10);
- 1 Localiza-se na Plataforma Noroeste (N22).

Neste conjunto, 16 destas nascentes são captadas (N6 a N21) e 3 das não captadas são de águas termais (N1, N2 e N22).

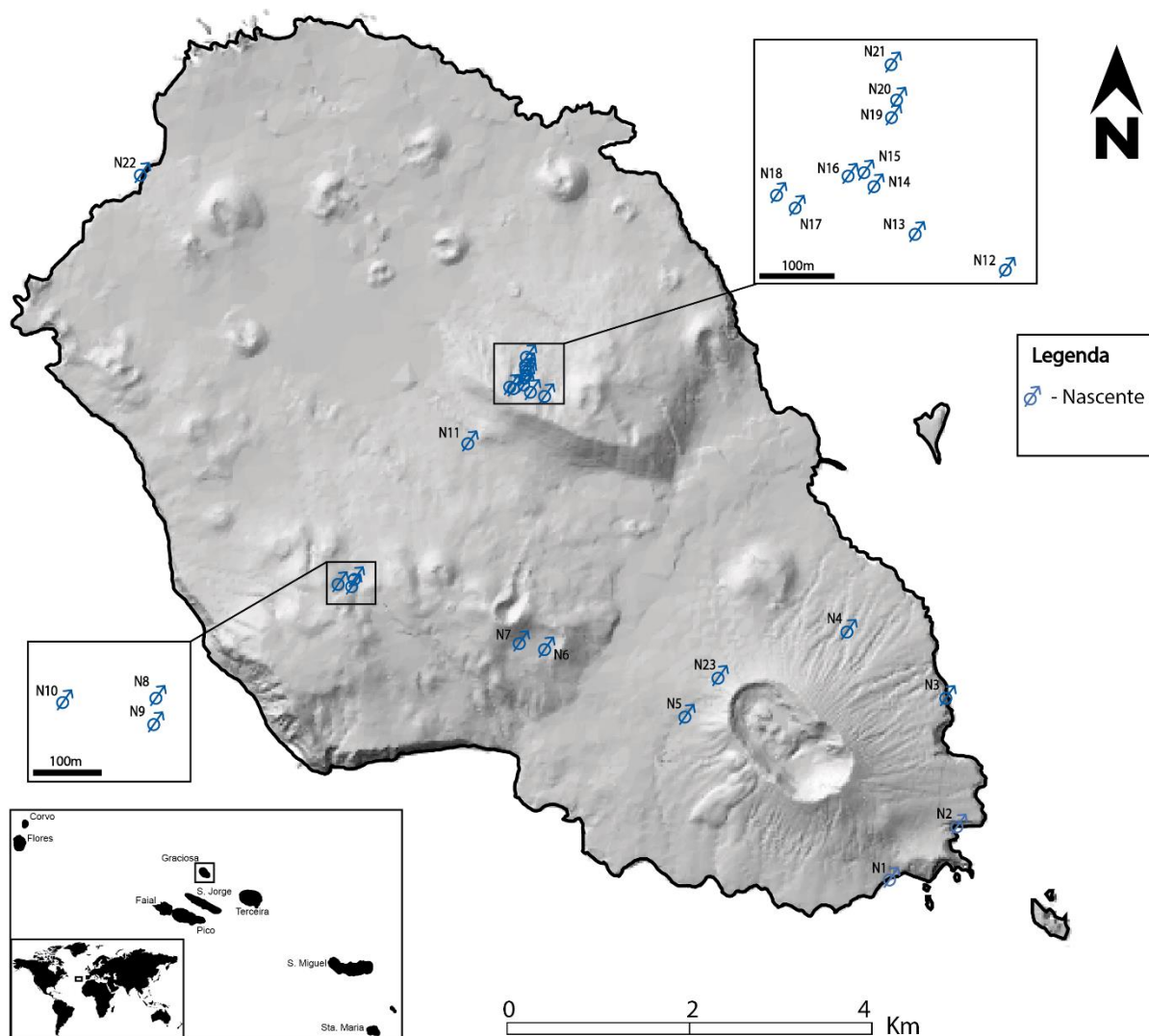


Figura 4.2: Distribuição geográfica das 23 nascentes inventariadas na ilha Graciosa.

Tabela 4.1: Inventário (latitude; longitude e altitude) de pontos de água: Nascentes. (ver localização nas Fig. 4.1 e 4.2).

| Ref. | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|------|---------------|---------------|--------------|
| N1 | 39° 0'45.32"N | 27°57'32.38"W | 0 |
| N2 | 39° 1'0.94"N | 27°57'6.26"W | 1 |
| N3 | 39° 1'47.57"N | 27°57'11.35"W | 36 |
| N4 | 39° 2'11.56"N | 27°57'57.75"W | 116 |
| N5 | 39° 1'41.11"N | 27°59'10.95"W | 142 |
| N6 | 39° 2'4.52"N | 28° 0'14.16"W | 235 |
| N7 | 39° 2'6.29"N | 28° 0'25.80"W | 250 |
| N8 | 39° 2'27.20"N | 28° 1'40.69"W | 286 |
| N9 | 39° 2'25.82"N | 28° 1'40.83"W | 292 |
| N10 | 39° 2'26.90"N | 28° 1'46.74"W | 295 |
| N11 | 39° 3'16.90"N | 28° 0'50.11"W | 140 |
| N12 | 39° 3'33.44"N | 28° 0'16.43"W | 309 |
| N13 | 39° 3'35.21"N | 28° 0'22.07"W | 299 |
| N14 | 39° 3'37.82"N | 28° 0'24.85"W | 274 |
| N15 | 39° 3'38.65"N | 28° 0'25.55"W | 266 |
| N16 | 39° 3'38.41"N | 28° 0'26.64"W | 269 |
| N17 | 39° 3'36.46"N | 28° 0'29.95"W | 288 |
| N18 | 39° 3'37.23"N | 28° 0'31.34"W | 282 |
| N19 | 39° 3'42.29"N | 28° 0'23.85"W | 234 |
| N20 | 39° 3'43.52"N | 28° 0'23.54"W | 226 |
| N21 | 39° 3'46.16"N | 28° 0'24.04"W | 207 |
| N22 | 39° 4'52.12"N | 28° 3'21.58"W | 0 |
| N23 | 39° 1'50.16"N | 27°58'57.25"W | 189 |

A maioria destas nascentes ocorre associada ao contacto de dois substratos geológicos com permeabilidade distintas (Fig. 4.3): uma camada permeável, geralmente superior, que permite o fluxo subterrâneo (A), e uma impermeável (B), que impede a infiltração. Assim, tendo em conta esta caracterização, é comum a ocorrência de nascentes nas periferias de cones vulcânicos, talwegues de linha de água, frente de escoadas e tubos lávicos.

Na ilha Graciosa, as nascentes associadas a aquíferos suspensos ocorrem nas vertentes ou no sopé dos cones vulcânicos (Fig. 4.4), nomeadamente, no Maciço Centro-Meridional e na Serra das Fontes. Também associadas a aquíferos suspensos ocorrem nascentes nas falésias costeiras do Maciço da Caldeira. As nascentes N5 e N23 encontram-se associadas a tubos lávicos enquanto N11 está associada a uma falha.

As principais manifestações hidrotermais (onde se incluem algumas nascentes) na ilha da Graciosa estão associadas ao vulcão da Caldeira, particularmente dentro da cavidade lávica da Furna do Enxofre, onde surgem um lago de água e algumas fumarolas. As nascentes termais mais importantes estão localizadas ao nível do mar (Fig. 4.5), nomeadamente no Carapacho (N1) (Carreira *et al.*, 2017), existindo ainda a NW da ilha, a nascente N22. Durante o período de preia mar encontram-se submersas.

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

A concentração e a captação da água emergente são usualmente realizadas com telhas de barro (Fig. 4.6) ou com pequenas valas cavadas no substrato impermeável (Fig. 4.3), sendo a água canalizada, de forma gravítica, até aos reservatórios/tanques onde se procede ao tratamento da mesma.

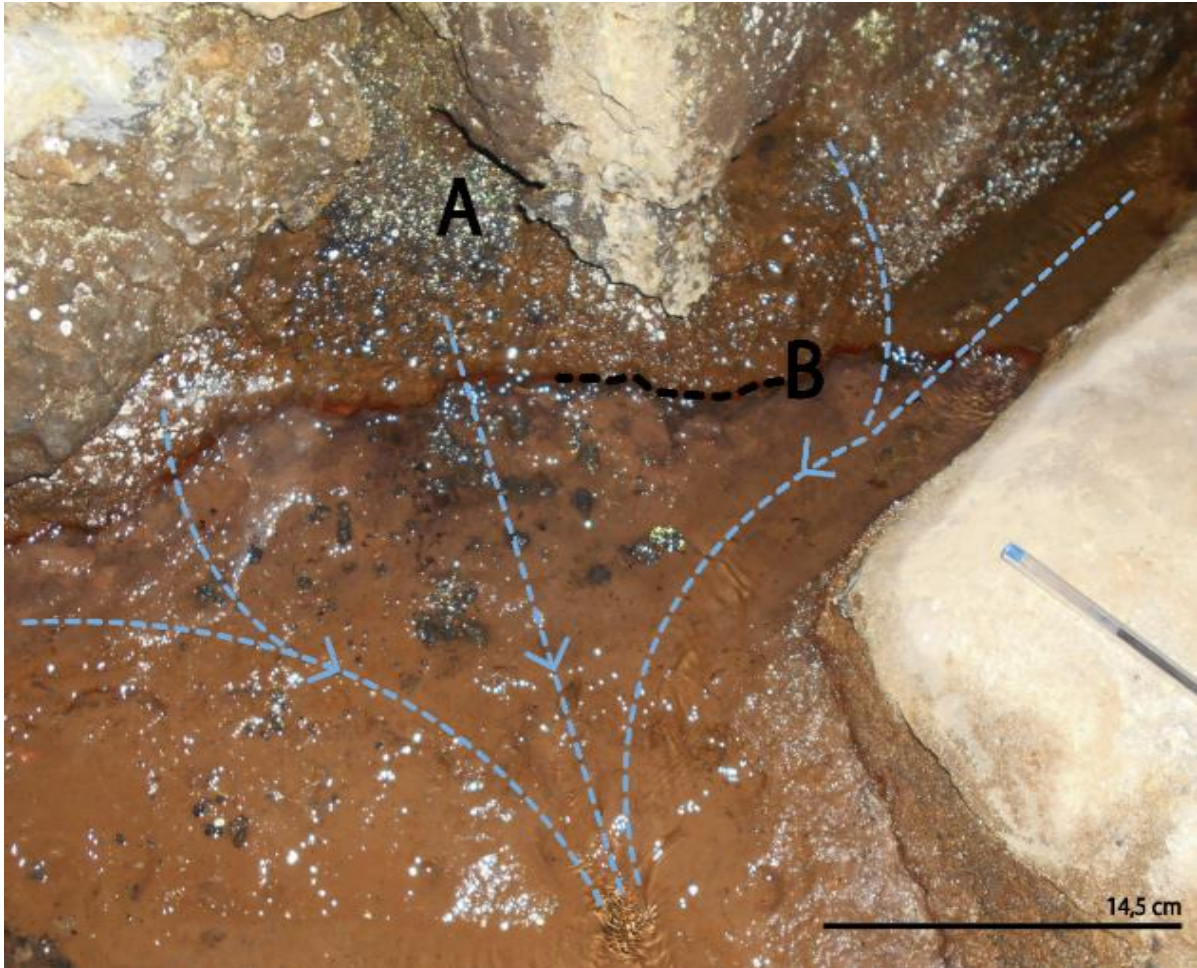


Figura 4.3: Captação da Nascente N9. (A - Pequeno depósito piroclástico; B - Paleossolo).

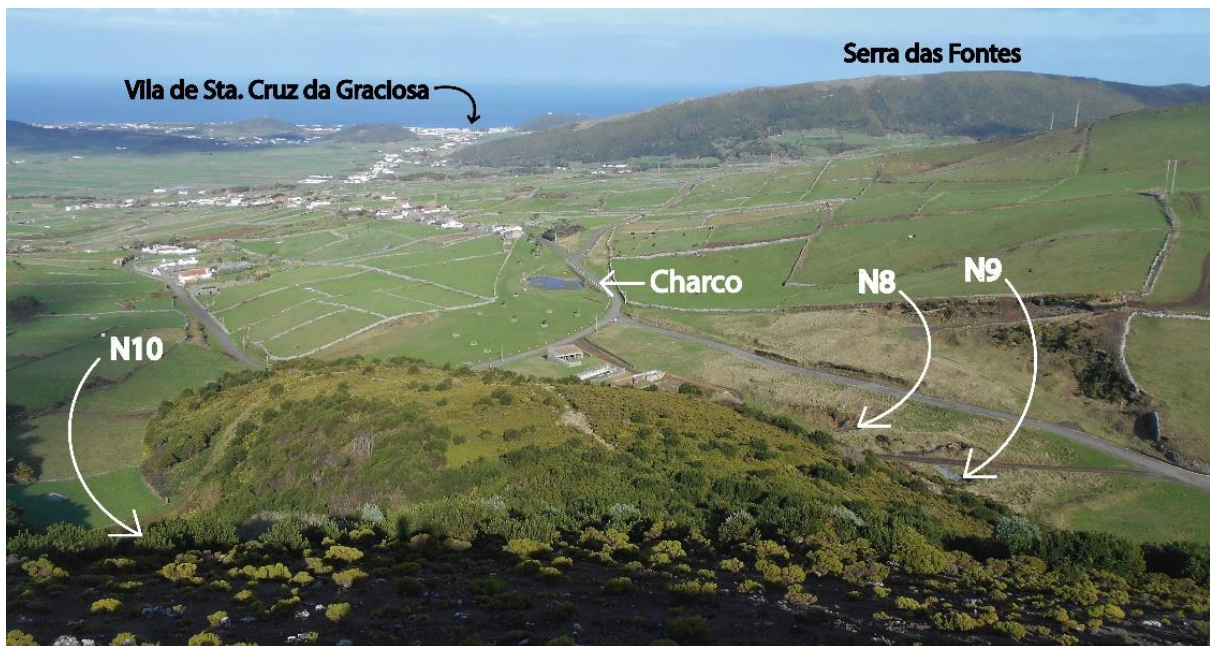


Figura 4.4: Vista da Serra Branca para as nascentes associadas a este cone vulcânico.



Figura 4.5: Piscinas de água quente do Carapacho, onde descarrega a nascente termal N1.



Figura 4.6: Captação por telhas da nascente N14.

4.1.2. Poços

Os poços são construções tubulares verticais de pouca profundidade e de grande diâmetro. Estas estruturas perfuram o nível não saturado de água, atingindo o nível freático, possibilitando a captação de água subterrânea.

Foram identificados seis poços (Tab. 4.2), sendo cinco destes localizados na Plataforma NW da ilha (P1, P2, P3, P4 e P5) e o poço P6 junto à costa E da ilha (Fig. 4.7). Dos cinco poços inventariados na Plataforma NW, dois foram soterrados (P4 e P5), sendo possível a identificação destes através dos vestígios locais (Fig. 4.8) e do testemunho do técnico da Câmara Municipal Santa Cruz da Graciosa.

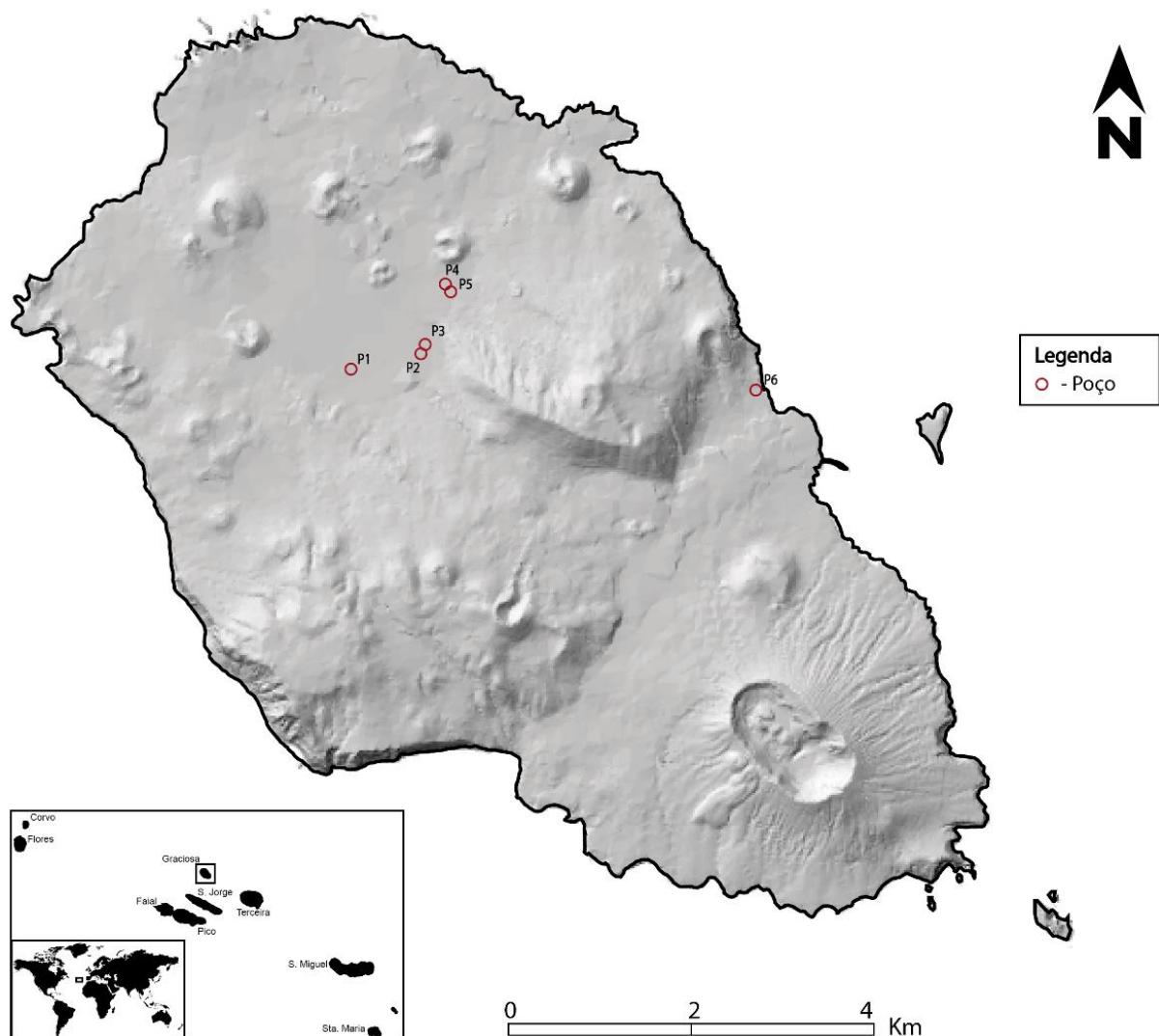


Figura 4.7: Distribuição geográfica dos 6 poços inventariados na ilha Graciosa.

Tabela 4.2: Inventário (latitude; longitude e altitude) de pontos de água: Poços (ver localização na Fig. 4.1 e 4.7).

| Ref. | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|------|---------------|---------------|--------------|
| P1 | 39° 3'43.83"N | 28° 1'44.50"W | 57 |
| P2 | 39° 3'49.66"N | 28° 1'12.80"W | 66 |
| P3 | 39° 3'52.69"N | 28° 1'11.15"W | 64 |
| P4 | 39° 4'14.76"N | 28° 1'2.01"W | 68 |
| P5 | 39° 4'11.58"N | 28° 0'59.58"W | 71 |
| P6 | 39° 3'38.29"N | 27°58'40.79"W | 8 |

Os poços localizados na Plataforma NW apresentam características muito semelhantes, sendo construídos com materiais da mesma tipologia (rochas basálticas *s.l.*) (Fig. 4.9), mas com graus de conservação diferentes. Por se tratar de uma área aplanada, não há afloramentos que possibilitem a caracterização geológica no local, sendo identificadas apenas as rochas basálticas (*s.l.*), com elevada alteração superficial, que constituem as divisões das

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

propriedades agrícolas. No anexo I encontram-se as tabelas resumo das fichas dos pontos de água com a informação mais detalhada de cada poço.

No Arquipélago dos Açores existem dois tipos de poços, os poços que captam águas de aquíferos suspensos e os que captam águas de aquíferos basais, sendo estes últimos denominados de “poços de maré”. Estes poços, do tipo de “poço de maré”, têm oscilações do nível freático por influências da ação das marés. Na ilha Graciosa apenas o P6 é identificado como poço de maré (Fig. 4.10).



Figura 4.8: Poço P4, localizado na Plataforma NW da ilha Graciosa.



Figura 4.9: Poço P3, localizado na Plataforma NW da ilha Graciosa.



Figura 4.10: Poço P6 é um poço de maré, localizado a E da ilha, perto da linha de costa.

4.1.3. Furos

Os furos são construções subterrâneas verticais de forma tubular, com pequeno diâmetro e atingindo normalmente profundidades elevadas (dezenas ou centenas de metros). Estas estruturas perfuram o terreno atingindo os sistemas e unidades aquíferos. Este processo de captação de água subterrânea exige equipamentos específicos para o seu funcionamento, nomeadamente, uma eletrobomba submersível e uma coluna que permita a entrada, circulação e elevação de água até à superfície. À superfície é construída uma pequena casa (Fig 4.12) onde são instalados os restantes equipamentos, nomeadamente, uma válvula motorizada, comandada por um quadro elétrico, e o mesmo quadro que dá energia ao grupo submersível que se encontra no fundo do furo (SIARAM, 2011). No anexo I são apresentadas estas características para cada um dos furos inventariados.

Das 17 perfurações inventariadas, os elementos referentes a duas foram retirados da bibliografia (F15 e F17) (PRA, 2001) e os restantes obtidos durante os trabalhos de campo (Tab. 4.3). Cinco dos furos inventariados são de águas termais (F1, F2, F3, F15, F17), 4 furos encontram-se selados (F7, F8, F10, F14) (Fig.4.13), 3 encontram-se com problemas técnicos ou em manutenção (F5, F13, F12) e apenas 5 estão a ser utilizados para captação de água para abastecimento público (F4, F6, F9, F11, F16).

A distribuição espacial dos furos faz-se preferencialmente a N e a NW da Serra das Fontes (Fig. 4.11). Dois grupos de furos localizam-se nas proximidades da Caldeira, um grupo

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

a NW e outro a SE desta estrutura, existindo ainda um furo situado a NW da Serra Branca e outro no interior do *graben* central da ilha.

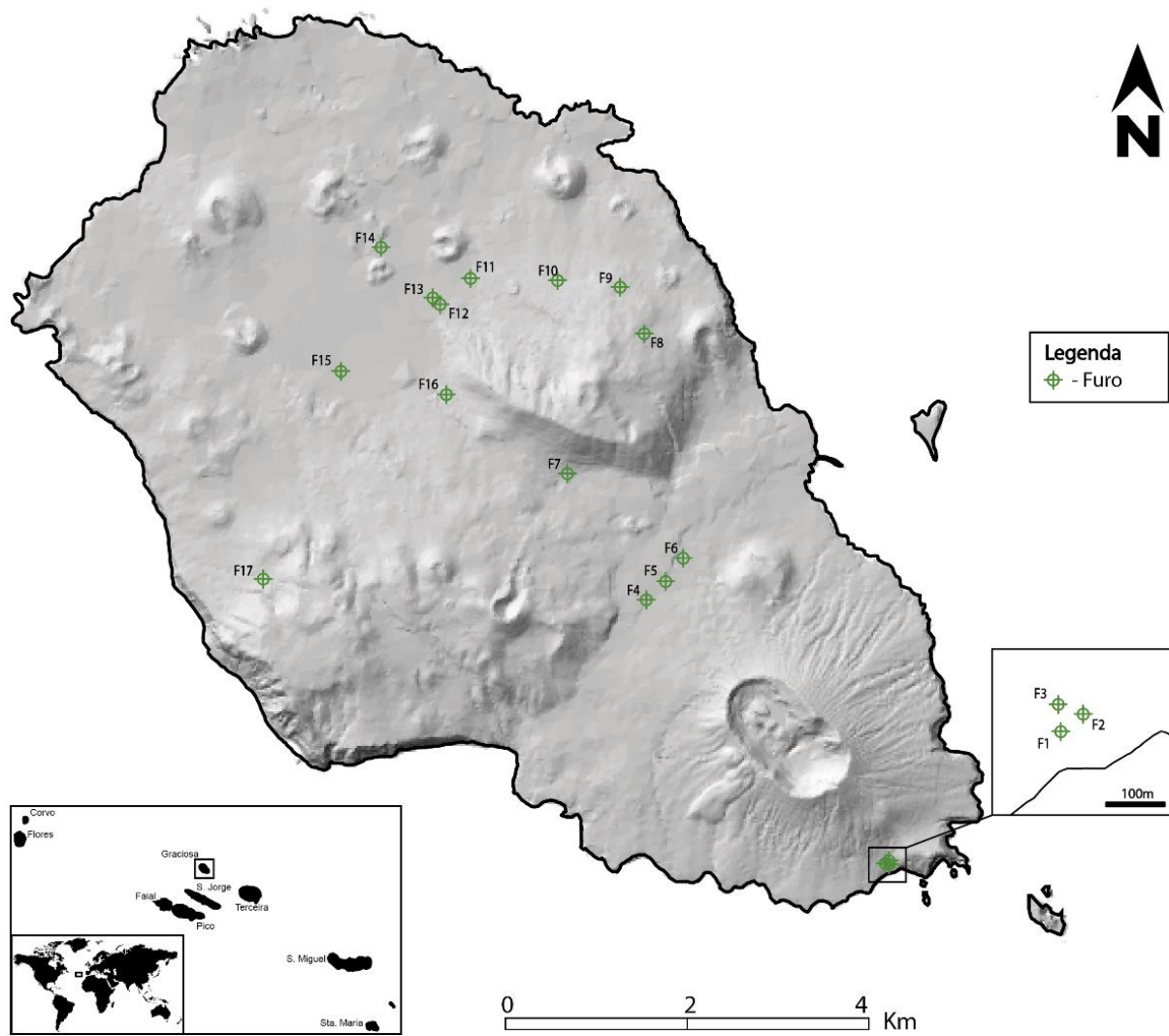


Figura 4.11: Distribuição geográfica dos 17 furos inventariados na ilha Graciosa.

Tabela 4.3: Inventário (latitude; longitude e altitude) de pontos de água: Furos (ver localização nas Fig. 4.1 e 4.11).

| Ref. | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|------|---------------|---------------|--------------|
| F1 | 39° 0'46.26"N | 27°57'36.20"W | 24 |
| F2 | 39° 0'47.12"N | 27°57'34.67"W | 27 |
| F3 | 39° 0'47.67"N | 27°57'36.39"W | 37 |
| F4 | 39° 2'21.25"N | 27°59'26.87"W | 111 |
| F5 | 39° 2'27.98"N | 27°59'18.06"W | 107 |
| F6 | 39° 2'36.79"N | 27°59'10.42"W | 96 |
| F7 | 39° 3'6.15"N | 28° 0'3.77"W | 128 |
| F8 | 39° 3'56.29"N | 27°59'29.45"W | 218 |
| F9 | 39° 4'13.64"N | 27°59'40.77"W | 150 |
| F10 | 39° 4'15.62"N | 28° 0'9.33"W | 128 |
| F11 | 39° 4'15.37"N | 28° 0'49.22"W | 74 |
| F12 | 39° 4'6.83"N | 28° 1'2.89"W | 69 |
| F13 | 39° 4'8.98"N | 28° 1'6.28"W | 66 |
| F14 | 39° 4'27.01"N | 28° 1'30.34"W | 58 |
| F15 | 39° 3'41.69"N | 28° 1'47.83"W | 60 |
| F16 | 39° 3'33.85"N | 28° 0'59.52"W | 105 |
| F17 | 39° 2'26.77"N | 28° 2'22.26"W | 213 |

As bocas dos furos encontram-se a altitudes que variam entre os 24 m e os 218 m. Todas as perfurações da ilha Graciosa atingem ou ultrapassam a cota zero, captando, assim, a(s) unidade(s) aquífera basal.



Figura 4.12: Casa da captação do furo F13, que se encontra em manutenção.



Figura 4.13: Furo selado, localizado na Serra das Fontes - F8.

4.2. Resultados

Para a caracterização hidrogeológica do domínio em estudo efetuou-se o reconhecimento de campo, no período de 17 a 28 de dezembro de 2018, dos diversos pontos de água. Em cada ponto mediu-se, quando possível, os seguintes parâmetros físico-químicos: profundidade da água nos poços e furos; condutividade elétrica (CE); e temperatura (T). Durante esta campanha de campo foram colhidas amostras para as análises laboratoriais - determinação de Cloretos (Cl).

Para cada ponto preencheu-se uma ficha de campo (adaptada de Azevedo, 2014); apresentada no Anexo I que incluiu: (1) enquadramento geral do ponto de água; (2) características do ponto de água; (3) características da água; e (4) características da captação (nas situações que sejam captadas).

Aos resultados das medições de campo, adicionaram-se dados retirados de diversas publicações científicas, nomeadamente, em Cruz & França (2006), Cruz *et al.* (2010), Cruz *et al.* (2011), Freire (2013), Cruz *et al.* (2014), Cruz & Andrade (2017).

Foram ainda analisados dados referentes à rede de monitorização de pontos de água na ilha a partir de 2003, apresentados no anexo II e retirados do Portal do Governo Regional dos Açores².

Adicionaram-se ainda dados retirados dos seguintes documentos:

- Relatórios dos furos da Câmara Municipal de Santa Cruz da Graciosa;
- Análises físico-químicas realizadas entre 2016 a 2018, solicitadas às empresas Agroleico e INOVA pela Câmara Municipal de Santa Cruz da Graciosa (An. II);
- Monitorização dos níveis piezométricos dos poços, realizado por Gaspar (1996) entre março de 1993 e julho de 1994, os quais estão relacionados com a precipitação.

4.2.1. Nascentes

Na tabela 4.4 apresentam-se os resultados das medições de campo efetuadas *in situ* nas nascentes, os resultados das análises laboratoriais, os dados fornecidos pela Câmara Municipal de Santa Cruz da Graciosa e os dados obtidos na bibliografia consultada.

Tabela 4.4: Resultados das medições efetuadas nas nascentes N1, N2, N3, N6, N7 e N9. (T -Temperatura; pH; CE -Condutividade Elétrica; C.P. -Cota piezométrica; Cl - Cloretos).

| Ref. | Fonte | T (°C) | pH | CE (µS/cm) | Cl ⁻ (mg/L) |
|------|-----------------------------------|--------|-----|------------|------------------------|
| N1 | Cruz <i>et al.</i> (2010) | 39,7 | 6,9 | 10140,0 | 3127,50 |
| | Freire (2013) | 32,7 | 7,0 | 11460,0 | 3536,83 |
| N2 | Cruz <i>et al.</i> (2010) | 53,2 | 6,4 | 43100,0 | 8821,40 |
| | Freire (2013) | 56,2 | 6,3 | 45300,0 | 17742,90 |
| N3 | Medição <i>in situ</i> (dez-2018) | 18,2 | - | 602,0 | - |
| | Medição laboratorial (jan-2019) | 19,2 | 7,9 | - | 62,75 |
| | | 22,3 | 7,1 | 358,0 | 63,46 |
| | Medição laboratorial (fev-2019) | 22,8 | 8,6 | 413,0 | 94,65 |
| N6 | Medição <i>in situ</i> (dez-2018) | 17,3 | - | 449,0 | - |
| | Medição laboratorial (jan-2019) | 19,0 | 7,6 | - | 43,96 |
| | Medição laboratorial (fev-2019) | 22,4 | 8,3 | 245,4 | 27,30 |
| N7 | Medição <i>in situ</i> (dez-2018) | 15,3 | - | 444,0 | - |
| | Medição laboratorial (jan-2019) | 19,0 | 7,2 | - | 79,05 |
| | Medição laboratorial (fev-2019) | 23,0 | 7,8 | 1940,0 | 84,02 |
| N9 | Medição <i>in situ</i> (dez-2018) | 15,3 | - | 284,0 | - |
| | Medição laboratorial (jan-2019) | 18,5 | 7,4 | - | 44,31 |
| | Medição laboratorial (fev-2019) | 22,4 | 7,4 | 291,0 | 45,02 |

² <http://www.azores.gov.pt/Gra/srrn-drotrh/conteúdos/livres/Rede+de+monitorização>

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

Tabela 4.5: Análise estatística dos parâmetros físico-químicos e da concentração de Cloretos nas nascentes da ilha Graciosa. (T -Temperatura; pH; CE -Condutividade Elétrica; Cl - Cloretos) (Fonte: Portal do Governo Regional dos Açores).

| Ref. | Stat. | T (°C) | pH | CE (µS/cm) | Cl ⁻ (mg/L) |
|---------|---------------|--------|-----|------------|------------------------|
| N6-N7 | Máximo | 21,0 | 7,8 | 470,0 | 68,0 |
| | Mínimo | 16,4 | 7,1 | 388,0 | 38,0 |
| | Desvio Padrão | 1,2 | 0,2 | 22,8 | 9,8 |
| | Média | 18,2 | 7,5 | 418,3 | 55,9 |
| N9 | Máximo | 19,0 | 8,9 | 440,0 | 89,0 |
| | Mínimo | 14,6 | 7,4 | 280,0 | 44,0 |
| | Desvio Padrão | 1,5 | 0,4 | 52,9 | 16,9 |
| | Média | 16,8 | 8,1 | 319,3 | 55,7 |
| N12-N21 | Máximo | 20,0 | 9,0 | 979,0 | 277,0 |
| | Mínimo | 13,0 | 7,4 | 220,0 | 34,0 |
| | Desvio Padrão | 2,0 | 0,4 | 308,7 | 95,6 |
| | Média | 17,4 | 7,8 | 389,1 | 82,2 |

Tabela 4.6: Valores médios mensais de caudais (Q=L/min) medidos nas diversas nascentes da ilha Graciosa, entre 2015 a 2018 (Fonte: CM de Sta. Cruz da Graciosa).

| Ref. | Ano | jan. | fev. | mar. | abr. | mai. | jun. | jul. | ago. | set. | out. | nov. | dez. |
|---------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| N6-N7 | 2015 | 34 | 32 | - | - | 33 | 27 | 24 | 12 | 24 | - | 48 | - |
| | 2016 | - | 120 | - | 60 | - | 48 | 36 | - | 22 | 20 | 34 | - |
| | 2017 | 22 | 42 | 39 | 42 | 36 | 36 | 8 | 26 | 26 | 4 | 20 | 27 |
| | 2018 | 27 | 26 | 60 | 42 | 24 | 8 | 16 | 14 | 14 | 9 | 8 | 8 |
| | Média | 28 | 55 | 50 | 48 | 31 | 30 | 21 | 17 | 22 | 11 | 28 | 18 |
| N9 | 2015 | 11 | 10 | - | - | 14 | 12 | 10 | 10 | 8 | - | 12 | - |
| | 2016 | - | 34 | - | 14 | - | 8 | 8 | - | 6 | 6 | 6 | - |
| | 2017 | 8 | 14 | 8 | 10 | 8 | 10 | 3 | 7 | 7 | 6 | 6 | 8 |
| | 2018 | 8 | 7 | 14 | 12 | 10 | 18 | 7 | 6 | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | Média | 9 | 16 | 11 | 12 | 11 | 12 | 7 | 8 | 7 | 6 | 7 | 6 |
| N12-N21 | 2015 | 14 | 8 | - | - | - | 4 | 3 | 1 | - | - | 20 | - |
| | 2016 | - | 20 | - | - | - | 2 | - | - | - | 1 | 1 | - |
| | 2017 | 10 | - | 15 | 17 | - | 8 | 27 | - | 1 | 1 | 2 | 20 |
| | 2018 | 12 | 8 | 120 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | Média | 12 | 12 | 68 | 14 | 3 | 4 | 11 | 1 | 1 | 1 | 6 | 10 |

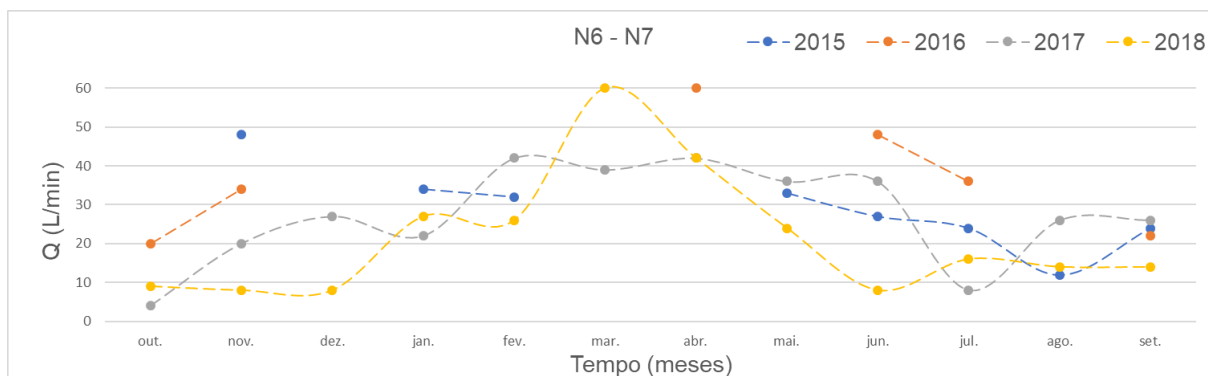


Figura 4.14: Evolução do caudal nas nascentes N6 e N7, medidos entre 2015 e 2018. (Fonte: CM de Sta. Cruz da Graciosa).

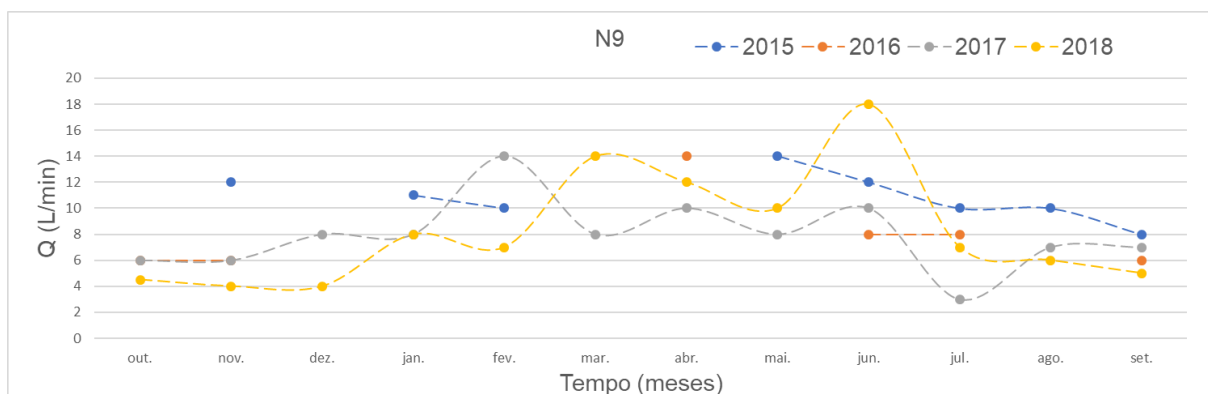


Figura 4.15: Caudais mensais da nascente N9, medidos entre 2015 e 2018. (Fonte: CM de Sta. Cruz da Graciosa).

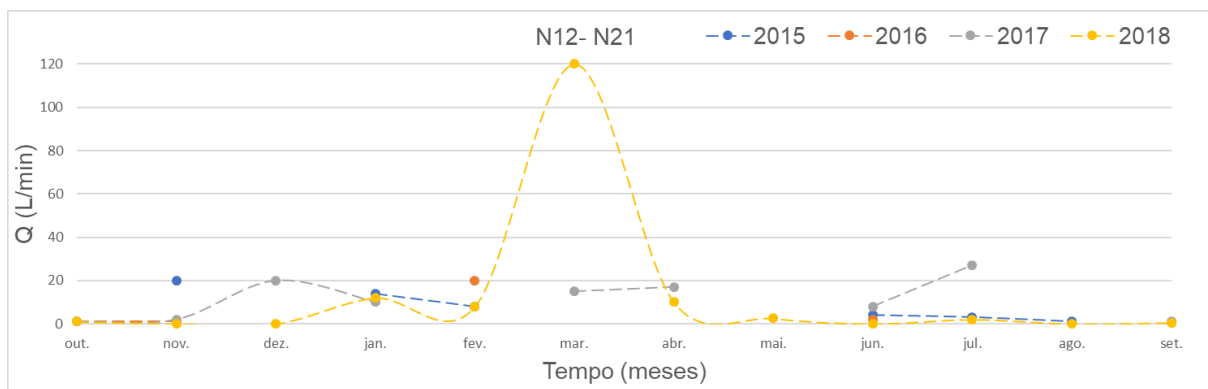


Figura 4.16: Caudais mensais das nascentes N12 a N21, medidos entre 2015 e 2018. (Fonte: CM de Sta. Cruz da Graciosa).

4.2.2. Poços

Na tabela 4.7 apresentam-se os resultados das medições de campo efetuadas *in situ* nos poços, os resultados das análises laboratoriais, os dados fornecidos pela Câmara Municipal de Santa Cruz da Graciosa e os dados obtidos na bibliografia consultada.

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

Tabela 4.7: Resultados das medições efetuadas nos poços P1, P2 e P3. (T - Temperatura; pH; CE -Condutividade Elétrica; C.P. -Cota piezométrica; Cl⁻ - Cloretos).

| Ref. | Fonte | T (°C) | pH | CE (µS/cm) | C.P. (m) | Cl ⁻ (mg/L) |
|------|-----------------------------------|--------|-----|------------|----------|------------------------|
| P1 | Medição <i>in situ</i> (dez-2018) | 19,8 | - | 390,0 | 50 | - |
| | Medição laboratorial (jan-2019) | 18,2 | 7,3 | 453,0 | - | 47,15 |
| | Medição laboratorial (fev-2019) | 22,9 | 7,3 | 373,0 | - | 48,57 |
| | Cruz & Andrade (2017) | 19,3 | 7,1 | 308,0 | - | 47,15 |
| P2 | Medição <i>in situ</i> (dez-2018) | 18,4 | - | 600,0 | 58 | - |
| | Medição laboratorial (jan-2019) | 19,1 | 7,0 | - | - | 104,58 |
| | Medição laboratorial (fev-2019) | 23,3 | 7,4 | 231,3 | - | 23,75 |
| | Cruz & Andrade (2017) | 18,8 | 6,8 | 446,0 | - | 57,18 |
| P3 | Medição <i>in situ</i> (dez-2018) | 18,1 | - | 445,0 | 57 | - |
| | Medição laboratorial (jan-2019) | 18,2 | 7,3 | 453,0 | - | 37,93 |
| | Medição laboratorial. (fev-2019) | 23,3 | 6,9 | 581,0 | - | 98,20 |
| | Cruz & Andrade (2017) | 19,2 | 6,7 | 509,0 | - | 75,21 |

Tabela 4.8: Valores médios mensais das Temperaturas (T) registadas no poço P3, correspondentes a 168 medições, efetuadas entre agosto de 1994 e fevereiro de 1995 (Fonte: Gaspar, 1996).

| Temp (°C) | ago./94 | set./94 | out./94 | nov./94 | dez./94 | jan./95 | fev./95 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| P3 | 17,56 | 17,77 | 17,93 | 17,3 | 16,78 | 16,67 | 16,74 |

Tabela 4.9: Valores mensais da precipitação (Prec.) (mm) e valores médios mensais das cotas piezométricas (m) dos poços P1, P2 e P3, correspondentes a 293 medições, efetuadas entre março de 1993 e junho de 1994 (Fonte: Gaspar, 1996).

| mês | Prec. (mm) | Cotas piezométricas (m) | | |
|---------|------------|-------------------------|-------|-------|
| | ilha | P1 | P2 | P3 |
| mar./93 | 97,03 | 51,92 | 59,54 | 57,87 |
| abr./93 | 43,73 | 51,71 | 59,46 | 57,46 |
| mai./93 | 101,77 | 51,46 | 59,28 | 57,40 |
| jun./93 | 51,90 | 51,28 | 59,11 | 57,28 |
| jul./93 | 3,90 | 50,92 | 58,95 | 56,85 |
| ago./93 | 78,20 | 50,71 | 58,81 | 56,66 |
| set./93 | 39,77 | 50,58 | 58,71 | 56,59 |
| out./93 | 75,03 | 50,46 | 58,57 | 56,56 |
| nov./93 | 94,07 | 50,43 | 58,45 | 56,65 |
| dez./93 | 35,67 | 50,60 | 58,42 | 56,76 |
| jan./94 | 40,23 | 50,38 | 58,37 | 56,56 |
| fev./94 | 100,03 | 50,29 | 58,29 | 56,48 |
| mar./94 | 10,27 | 50,31 | 58,21 | 56,47 |
| abr./94 | 25,17 | 50,20 | 58,18 | 56,35 |
| mai./94 | 64,07 | - | - | - |
| jun./94 | 6,93 | 49,95 | 58,08 | 56,22 |
| jul./94 | 38,27 | 49,90 | 58,06 | 56,18 |
| Média | 53,30 | 50,69 | 58,66 | 56,77 |
| Soma | 906,03 | - | - | - |

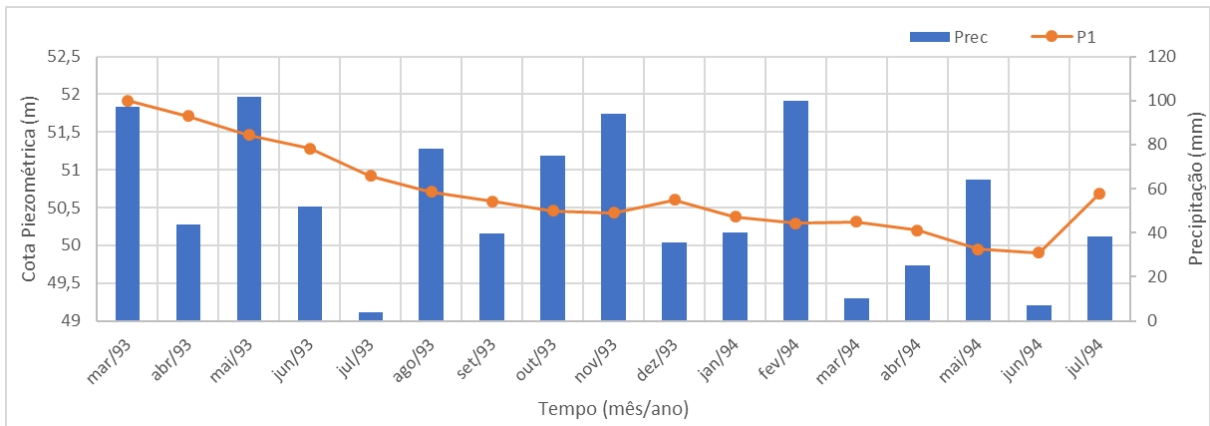


Figura 4.17: Valores mensais da precipitação (mm) e valores médios mensais das cotas piezométricas (m) do poço P1, medidos entre março de 1993 e junho de 1994 (Fonte: Gaspar, 1996).

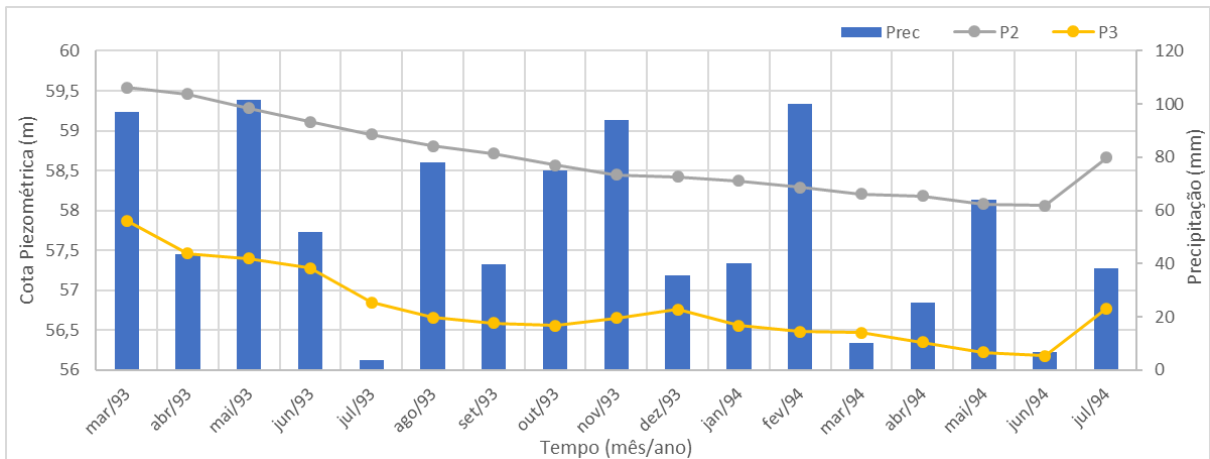


Figura 4.18: Valores mensais da precipitação (mm) e valores médios mensais das cotas piezométricas (m) do poço P2 e P3, medidos entre março de 1993 e junho de 1994 (Fonte: Gaspar, 1996).

4.2.3. Furos

Na tabela 4.11 apresentam-se os resultados das medições de campo efetuadas *in situ* nos furos, os resultados das análises laboratoriais, os dados fornecidos pela Câmara Municipal de Santa Cruz Graciosa e os dados obtidos na bibliografia consultada.

Tabela 4.10: Dados dos diversos furos da ilha Graciosa. (Prof. - Profundidade; NHE - Nível hidrostático; NHD - Nível hidrodinâmico; Dist. - Distância).

| Ref. | Cota da superfície (m) | Prof. do furo (m) | NHE (m) | NHD (m) | Dist. à costa (m) | Caudal específico (m ³ /s/m) |
|------|------------------------|-------------------|---------|---------|-------------------|-----------------------------------------|
| F4 | 110,8 | 121,2 | 1,20 | 1,17 | 2140 | 266,67 |
| F5 | 107,0 | 109,9 | 0,75 | 0,71 | 1845 | 177,50 |
| F6 | 95,5 | 99,0 | 2,30 | 2,23 | 1560 | 142,86 |
| F7 | 128,0 | 128,5 | ? | - | 2315 | 83,30 |
| F8 | 218,0 | - | - | - | 995 | - |
| F9 | 150,0 | 158,0 | -0,50 | -2,65 | 950 | 5,71 |
| F10 | 128,0 | 135,0 | 1,90 | 1,80 | 1405 | - |
| F11 | 74,0 | 80,0 | 0,70 | 0,54 | 1920 | 31,25 |
| F12 | 69,2 | 79,2 | 1,70 | 1,66 | 2260 | 192,50 |
| F13 | 66,0 | 71,0 | 1,70 | 1,65 | 2430 | 200,00 |
| F14 | 58,0 | 68,0 | ? | - | 2080 | 1,36 |
| F16 | 104,5 | 110,0 | -0,32 | -0,47 | 3200 | 33,33 |

Nota: Estes dados tiveram como base as localizações geográficas determinadas em campo e os relatórios de furo, sendo as distâncias à costa determinadas no Google Earth. Os dados do caudal específico foram consultados em Freire (2013).

Tabela 4.11: Resultados das medições efetuadas em diversos furos na ilha Graciosa. (T - Temperatura; pH; CE - Condutividade Elétrica; e Cl⁻ - Cloretos).

| Ref. | Fonte | T (°C) | pH | CE (µS/cm) | Cl ⁻ (mg/L) |
|---------------------------|-----------------------------------|--------|---------|------------|------------------------|
| F1 | Freire (2013) | 38,5 | 6,4 | 10940,0 | 2816,2 |
| F2 | | 40,6 | 6,6 | 22800,0 | 15734,0 |
| F3 | | 25,3 | 7,1 | 53000,0 | 20588,5 |
| F1, F2, F3* | Medição <i>in situ</i> (dez-2018) | 36,0 | - | 16240,0 | - |
| | Medição laboratorial (jan-2019) | 19,1 | 6,9 | - | 52607,8 |
| | Medição laboratorial (fev-2019) | 23,0 | 6,9 | 17290,0 | 5565,7 |
| | | 23,0 | 7,1 | 16910,0 | 5211,2 |
| | Cruz & França (2006) | 30,5 | 6,6 | 10076,0 | 2331,2 |
| Cruz <i>et al.</i> (2010) | 36,3 | 6,4 | 42000,0 | 16200,0 | |
| F4 | Medição <i>in situ</i> (dez-2018) | 20,1 | - | 3320,0 | - |
| | Medição laboratorial (jan-2019) | 18,9 | 7,1 | - | 709,0 |
| | Medição laboratorial (fev-2019) | 22,8 | 7,4 | 938,0 | 283,6 |
| | Cruz <i>et al.</i> (2011) | 20,0 | 7,2 | 2800,0 | 869,0 |
| | Cruz & Andrade (2017) | 19,5 | 6,8 | 1477,0 | 346,7 |
| F5 | Cruz <i>et al.</i> (2011) | 20,1 | 7,1 | 1808,0 | 480,0 |
| | Cruz & Andrade (2017) | 17,9 | 7,0 | 1079,0 | 257,9 |
| F6 | Medição <i>in situ</i> (dez-2018) | 16,3 | - | 2320,0 | - |
| | Medição laboratorial (jan-2019) | 18,9 | 7,1 | - | 354,5 |
| | Medição laboratorial (fev-2019) | 22,9 | 7,5 | 2221,0 | 496,3 |
| | Cruz <i>et al.</i> (2014) | - | 7,1 | 2536,0 | 741,6 |
| | Cruz & Andrade (2017) | 21,0 | 6,8 | 1585,0 | 359,0 |
| F9 | Medição <i>in situ</i> (dez-2018) | 19,2 | - | 1982,0 | - |
| | Medição laboratorial (jan-2019) | 18,9 | 6,7 | - | 212,7 |
| | Medição laboratorial (fev-2019) | 23,0 | 7,8 | 1940,0 | 496,3 |
| | Cruz & Andrade (2017) | 18,1 | 6,6 | 1205,0 | 244,3 |
| F10 | Relatório de furo | 20 | 7,8 | 596,0 | 116,0 |
| F11 | Medição <i>in situ</i> (dez-2018) | 20,3 | - | 1844,0 | - |
| | Medição laboratorial (jan-2019) | 18,9 | 7,2 | - | 141,8 |
| | Medição laboratorial (fev-2019) | 23,1 | 7,2 | 487,0 | 123,0 |
| | Cruz <i>et al.</i> (2011) | 23,1 | 7,7 | 1149,0 | 297,0 |
| | Cruz <i>et al.</i> (2014) | - | 7,7 | 1165,0 | 307,5 |
| | Cruz & Andrade (2017) | 24,3 | 7,1 | 1104,0 | 257,7 |
| F12 | Cruz <i>et al.</i> (2011) | 24,0 | 7,5 | 2800,0 | 869,0 |
| | Cruz <i>et al.</i> (2014) | - | 7,5 | 2775,0 | 259,8 |
| | Cruz & Andrade (2017) | 24,1 | 7,1 | 1652,0 | 427,0 |
| F13 | Cruz <i>et al.</i> (2011) | 25,0 | 7,6 | 1500,0 | 309,4 |
| | Cruz & Andrade (2017) | 25,8 | 7,1 | 2202,0 | 572,8 |
| F15 | Freire (2013) | 38,0 | 4,8 | 6640,0 | - |
| F16 | Medição <i>in situ</i> (dez-2018) | 26,4 | - | 6060,0 | - |
| | Medição laboratorial (jan-2019) | 19,0 | 7,5 | - | 1701,6 |
| | Medição laboratorial (fev-2019) | 23,0 | 7,5 | 60500,0 | 1701,6 |
| | Cruz <i>et al.</i> (2010) | 27,5 | 7,8 | 1153,0 | 1300,0 |
| | Cruz & Andrade (2017) | 25,3 | 7,2 | 3642,0 | 1032,1 |

*A análise individualizada dos furos F1, F2 e F3 não foi possível, sendo medidas em grupo, correspondendo a uma mistura de águas dos três furos.

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

Tabela 4.12: Análise estatística dos parâmetros físico-químicos e da concentração de Cloretos nos furos da ilha Graciosa. (T -Temperatura; pH; CE -Condutividade Elétrica; Cl⁻ - Cloretos) (Fonte: Portal do Governo Regional dos Açores e CM de Sta. Cruz da Graciosa).

| Ref. | Stat. | T (°C) | pH | CE (µS/cm) | Cl ⁻ (mg/L) |
|------|----------------------|--------|-----|------------|------------------------|
| F4 | Máximo | 23,2 | 7,3 | 3000,0 | 883,0 |
| | Mínimo | 16,5 | 6,5 | 1200,0 | 160,0 |
| | Desvio Padrão | 1,9 | 0,2 | 548,6 | 222,7 |
| | Média | 19,6 | 7,0 | 2317,9 | 619,2 |
| F5 | Máximo | 19,0 | 7,1 | 2800,0 | 728,0 |
| | Mínimo | 18,0 | 6,9 | 1200,0 | 188,0 |
| | Desvio Padrão | 0,4 | 0,1 | 664,8 | 206,7 |
| | Média | 18,2 | 7,0 | 1620,0 | 379,6 |
| F6 | Máximo | 23,0 | 7,3 | 2400,0 | 622,0 |
| | Mínimo | 18,0 | 7,0 | 1407,0 | 320,0 |
| | Desvio Padrão | 2,2 | 0,1 | 402,7 | 115,9 |
| | Média | 19,8 | 7,2 | 1706,8 | 424,4 |
| F9 | Máximo | 23,0 | 7,4 | 2300,0 | 615,0 |
| | Mínimo | 17,0 | 6,7 | 504,0 | 86,0 |
| | Desvio Padrão | 2,0 | 0,2 | 485,6 | 131,1 |
| | Média | 19,5 | 6,9 | 1510,0 | 389,1 |
| F11 | Máximo | 23,5 | 7,9 | 9600,0 | 370,0 |
| | Mínimo | 17,0 | 7,0 | 840,0 | 184,0 |
| | Desvio Padrão | 2,2 | 0,3 | 2152,6 | 41,4 |
| | Média | 19,3 | 7,6 | 1789,8 | 291,4 |
| F12 | Máximo | 25,0 | 7,9 | 4000,0 | 1360,0 |
| | Mínimo | 17,0 | 7,2 | 1390,0 | 24,0 |
| | Desvio Padrão | 3,4 | 0,2 | 913,4 | 411,5 |
| | Média | 20,7 | 7,6 | 2505,0 | 680,0 |
| F16 | Máximo | 23,0 | 7,9 | 5700,0 | 1670,0 |
| | Mínimo | 17,0 | 6,8 | 3400,0 | 750,0 |
| | Desvio Padrão | 2,1 | 0,4 | 770,5 | 317,1 |
| | Média | 19,1 | 7,5 | 4521,4 | 1417,1 |

4.3. Tratamento e Interpretação de Resultados

4.3.1. Piezometria

4.3.1.1. Poços

Os poços inventariados na Plataforma NW da ilha Graciosa, P1, P2 e P3, apresentam bocas localizadas entre 57m e os 66m de altitude. Situam-se numa área hidrograficamente endorreica e aplanada onde confluem uma série de cursos de água provenientes da Serra das Fontes e da Serra Branca.

Analisando os dados da tabela 4.7, verifica-se que há uma variação considerável na cota freática destes poços, sendo mais elevada no poço P2 e mais baixa no poço P1. O poço P6 apresenta uma cota piezométrica igual ao nível do mar. Enquanto os níveis piezométricos dos primeiros poços não sofrem quaisquer influências das marés, indiciando tratar-se de um aquífero suspenso, o do poço P6 sofre, indicando ser um poço de maré.

De acordo com Gaspar (1996), os níveis piezométricos destas captações, monitorizados entre março de 1993 e julho de 1994 (Tab. 4.9), sofreram uma diminuição global de 2m, a qual pontualmente sofre oscilações associadas às variações de precipitação (Tab. 4.14 e 4.15). Esta diminuição foi interpretada como associada à abertura de furos nas proximidades, a qual se manteve constante conforme medido nos trabalhos de campos.

A análise do log do furo F14, localizado nas proximidades destes poços, permite inferir a existência de um paleossolo entre os 45 m e os 43,5 m de altitude, genericamente designado no respetivo relatório de “tufo vulcânico vermelho”. Considera-se que este nível impermeável é o responsável pela existência do aquífero suspenso intercetado por estes poços, o qual está associado a depósitos detríticos que recobrem as escoadas basálticas (s.l.) recentes.

4.3.1.2. Furos

Na tabela 4.10 listam-se os vários furos construídos na ilha, cujos níveis hidrostáticos, aquando da construção, variam entre 2,3 m (furo F6) e -0,5 m (furo F9). Estes valores indiciam claramente que estas captações intercetam as unidades aquíferas basais. Os rebaixamentos variam de furo para furo, dependendo da transmissividade das rochas do aquífero, dos caudais extraídos e dos períodos de exploração.

O número de furos com informação consistente e continuada do nível piezométrico não é suficiente para estimar a hidrodinâmica subterrânea com detalhe.

Não foi possível obter o nível hidrostático dos furos hidrotermais.

4.3.2. Caudais de Nascentes

O gráfico apresentado na figura 4.19 mostra a variação de caudais médios mensais das nascentes N6-N7, N9 e N12-N21, no período compreendido entre 2015 e 2018. Estes foram medidos mensalmente à entrada dos respetivos reservatórios de cada grupo de nascentes, verificando-se um comportamento diferente ao longo do ano.

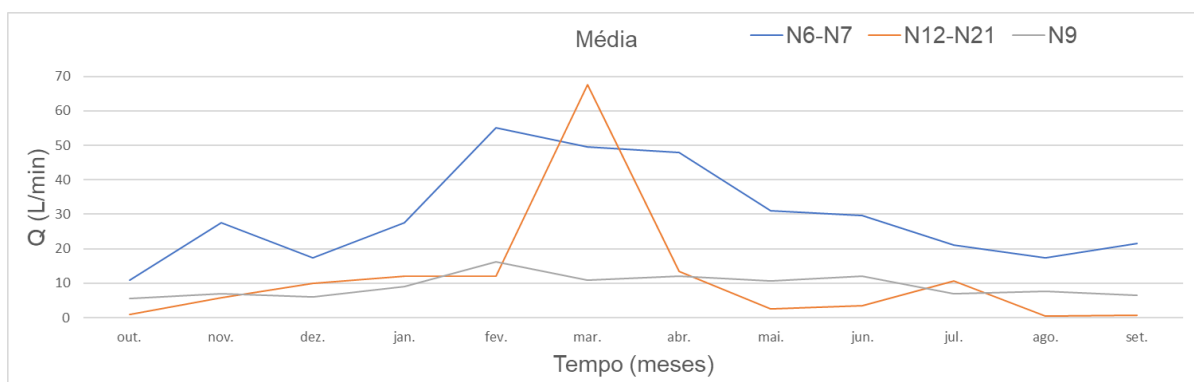


Figura 4.19: Variação média mensal dos caudais (L/min) de algumas nascentes da ilha Graciosa, dos anos 2015 a 2018 (Fonte CM Sta. Cruz da Graciosa).

Como pode ser observado na figura 4.19, os caudais das nascentes N6 e N7 apresentam variações sazonais, sendo superiores no inverno e inferiores no verão, facto que é concordante com as variações da precipitação.

A nascente N9 apresenta um caudal reduzido, mas constante durante todo o ano. Este fenómeno pode estar associado a uma recarga regular e contínua, provavelmente associada à Lagoa da Serra Branca, localizada na cratera do cone vulcânico adjacente (Fig. 4.20).

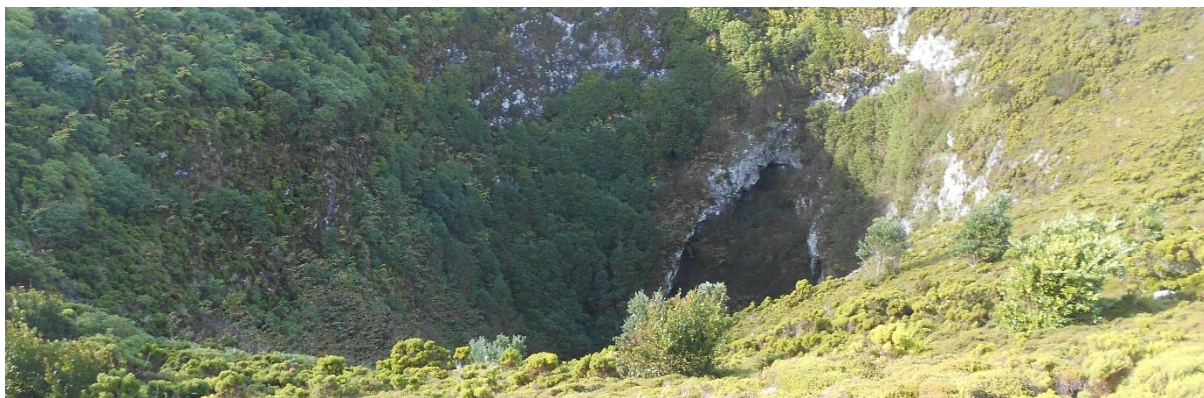


Figura 4.20: Cratera do cone vulcânico da Serra Branca.

O grupo de nascentes N12 a N21, localizado perto do cume da Serra das Fontes (Fig. 4.2), apresenta caudais efémeros, exurgindo apenas após eventos de precipitação (Fig. 4.6 e 4.9). Atendendo à geologia do local e à morfologia do terreno, admite-se que o nível impermeável que determina o aquífero suspenso associado a estas nascentes, apresenta um pendor concordante com o fluxo subterrâneo, esvaziando total ou quase totalmente a reserva hídrica do aquífero.

4.3.3. Temperatura da Água

4.3.3.1. Nascentes

As nascentes inventariadas na ilha Graciosa apresentam temperaturas que variam entre 13 °C e 56,2 °C. Estas podem ser divididas em 2 grupos: as termais, com temperaturas superiores à Temperatura média atmosférica; e as frias, com temperaturas inferiores à média atmosférica da ilha (Tab. 4.4 e 4.5).

Todas as nascentes termais localizam-se na linha de costa, na zona intertidal, estando muito provavelmente associadas a unidades aquíferas basais, com variações de temperaturas entre 32,7 °C e 56,2 °C.

De acordo com as tabelas 4.4 e 4.5, os valores da temperatura das nascentes frias sofrem grandes variações, da ordem dos 7 °C nas nascentes N12 a N21 e dos 5 °C nas restantes monitorizadas ao longo do ano, sendo mais elevado no fim do verão e mais baixos no final do inverno. Este facto reflete a superficialidade das massas de água associadas a estas exurgências.

4.3.3.2. Poços

A temperatura da água presente nas captações P1, P2 e P3 varia entre 18,1 °C e 19,8 °C, ou seja, está próxima da temperatura média anual da atmosfera nesta localidade.

4.3.3.3. Furos

A água dos furos inventariados na ilha Graciosa apresenta temperaturas que variam entre 16,5 °C e 40,6 °C. Tal como a das nascentes podem ser divididas em 2 grupos: as termais, com temperaturas superiores à Temperatura média atmosférica; e as frias, com temperaturas inferiores à média atmosférica da ilha (Tab. 4.11 e 4.12).

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

As temperaturas medidas nos furos F1, F2 e F3 (Tab. 4.11 e 4.12) apresentam valores superiores a 25 °C, sensivelmente idênticos à da nascente termal N1. Este facto indicia que estes pontos de água captam uma secção do aquífero basal sujeito a fenómenos hidrotermais.

O furo F15 apresenta temperaturas da ordem dos 38 °C. Este localiza-se na faixa de fraturação associada ao Rifte da Terceira, onde se admite a ascensão de “águas juvenis”, o que pode explicar a sua natureza hidrotermal. O furo F16, igualmente localizado nesta faixa tectónica, apresenta também temperaturas elevadas, que ultrapassam os 25 °C, embora não sejam constantes.

Todos os restantes furos - F4, F6, F9, F11, F16- apresentam temperaturas inferiores entre 17 °C e 20 °C, sendo relativamente constantes (Tab. 4.11 e 4.12). Este facto indicia que o aquífero basal apresenta setores não afetados por hidrotermalismo.

4.3.4. Condutividade Elétrica (CE)

4.3.4.1. Nascentes

As nascentes termais apresentam valores de CE elevados, variando entre 10140 $\mu\text{S/cm}$ e 45300 $\mu\text{S/cm}$. Estas evidenciam uma grande mineralização, provavelmente associada à ascensão de “águas juvenis” (Tab. 4.4).

Nas nascentes frias, a N3 tem condutividades de 602 $\mu\text{S/cm}$, que poderá associado ao tempo de residência elevado entre a área de recarga e este ponto de descarga.

As nascentes N6 e N7 apresentam valores de CE muito semelhantes, com média de 418 $\mu\text{S/cm}$ (22,8 desvio padrão) (Tab. 4.5). Esta circunstância, aliada ao facto destes pontos de água se encontrarem a 285 m de distância e a uma diferença altitudinal de 15 m, aponta para a ocorrência de um aquífero suspenso comum.

Os valores da condutividade elétrica obtidos para as restantes nascentes (N9 e N12 a N21), são inferiores a 400 $\mu\text{S/cm}$, demonstrando uma fraca mineralização das águas e refletindo um tempo de residência no aquífero curto. A ocorrência pontual de valores de CE superiores a 900 $\mu\text{S/cm}$ evidencia processos de contaminação antrópica associados ao mau uso dos solos.

4.3.4.2. Poços

As CE quantificadas em poços variam entre os 300 $\mu\text{S/cm}$ e os 600 $\mu\text{S/cm}$. Esta variação aparentemente não é compatível com pontos de água associados à mesma massa de água subterrânea. Contudo, esta acentuada dispersão pode ser explicada pela ocorrência de contaminações antrópicas decorrentes: (1) do mau estado de conservação dos poços, (2)

da acumulação de lixo nas imediações, (3) do mau uso dos solos, nomeadamente da aplicação de fertilizantes em pastagens e (4) da presença de fossas sépticas.

A CE no poço P1 sofreu um aumento entre 2014 (Cruz & Andrade, 2017) e as medições de campo efetuadas em 2018. Este facto poderá estar associado à acumulação de lixo doméstico verificado no local. No mesmo período, os poços P2 e P3 apresentam variações deste parâmetro, conforme o apresentado na tabela 4.7, mas não evidenciam depósito de lixo no local, sendo resultando provavelmente de contaminações associadas às fossas sépticas das habitações próximas.

4.3.4.3. Furos

À semelhança das nascentes termais, os furos da mesma natureza destacam-se pelas elevadas CE, ultrapassando os valores de 10000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tab. 4.11), refletindo uma elevada mineralização da água. Esta, para além de resultar de fenómenos de intrusão de água salgada do oceano, também é influenciada pela atividade vulcânica e “águas juvenis” muito mineralizadas, chegando a atingir valores de 53000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de CE (furo F3, Tab. 4.11), o que se aproxima muito dos valores de CE da água do oceano (55000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ segundo *Fondriest*³).

Os furos não termais ou “frios” captam água dos aquíferos basais e apresentam um vasto leque de CE que variam entre 935 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 6060 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tab. 4.11 e 4.12). Estas variações mostram claramente a ocorrência de contaminações com águas de origem marinha, cuja presença depende do tempo de exploração dos furos.

De acordo com o Decreto-Lei n.º 152/2017, relativo à qualidade da água para consumo humano, o valor paramétrico de CE deverá ser inferior a 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20 °C. A maior parte dos furos analisados apresentam pontualmente valores superiores a este limite, exceto no furo F16 onde estes são sempre superiores (Tab. 4.11 e 4.12).

4.3.5. pH

De acordo com os resultados apresentados no subcapítulo 4.2, os valores do pH das águas subterrâneas analisadas oscilaram nos poços entre 6,7 e 7,1 enquanto que nos furos de águas frias variaram entre 6,5 e 7,9 e nas nascentes de água fria entre 7,1 e 9. Nas nascentes e furos termais este parâmetro oscila entre 4,8 e 7,1.

A tendência para a ocorrência de águas subterrâneas “frias” ligeiramente ácidas aponta para circulações e tempos de residência curtos. Os valores de pH superiores a 8, nas

³ www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity

nascentes, estão provavelmente associados à fertilização dos solos, uma vez que ocorrem preferencialmente nos períodos de maior atividade agrícola, ou seja, na primavera e início de verão.

A ocorrência de águas com um grau de acidez inferior a 6,5, poderá estar associado a concentrações elevadas de dióxido de carbono na água provenientes de emanações profundas.

De acordo com o Decreto-Lei n.º 152/2017, relativo à qualidade da água para consumo humano, o valor paramétrico do pH deverá ser igual ou superior a 6,5 e igual ou inferior a 9,5. As águas captadas para consumo humano na ilha estão de acordo com este parâmetro.

4.3.6. Cloretos e Intrusão Salina

4.3.6.1. Nascentes

Como o referido anteriormente, todas as nascentes termais dispõem-se na linha de costa, correspondendo a descargas do aquífero basal. apresentam teores de cloretos (Cl⁻) elevados, com registos que variam entre um mínimo de 3127,50 mg/L e um máximo de 17742,90 mg/L (Tab. 4.4 e 4.5). Este facto reflete forte influência oceânica. Contrariamente, as nascentes não termais, associadas a aquíferos suspensos, apresentam valores baixos que variam entre 27 mg/L e 95 mg/L.

Na nascente N3 (Tab. 4.4) verificam-se concentrações de cloretos superiores à das restantes nascentes também associadas a aquíferos suspensos. Este facto reflete um enquadramento diferente, uma vez que este ponto de água surge na orla costeira a 36 m de altitude, numa zona muito sujeita à ocorrência de aerossóis enriquecidos em sais de origem marinha. Aceita-se também a hipótese do aquífero que descarrega neste ponto ser influenciado por fluxos geotérmicos provenientes da Caldeira.

Os teores de cloretos verificados nas nascentes N6 e N7 são diferenciados, apresentando N6 valores com uma maior variabilidade e N7 valores globalmente superiores, da ordem dos 30 a 40 mg/L. A variabilidade deste parâmetro deve-se ao uso dos solos nas áreas de recarga do respetivo aquífero, essencialmente ocupado por pastagens (Fig. 4.21). O teor de cloretos relativamente superior em N7 deve-se, provavelmente, à presença de instalações agrícolas, sobre a mesma, onde se concentram maior número de animais.

As análises da concentração de cloretos nas nascentes N12 a N21 apresentam valores baixos na ordem dos 40 mg/L. A ocorrência pontual de valores muito elevados evidencia processos de contaminação antrópica associados ao mau uso dos solos (Fig.4.22).

A água das nascentes N6, N7 e N12 a N21 apresentam um elevado número de bactérias coliformes, o que evidencia o impacto dos excrementos dos animais, na massa de água subterrânea, mencionados anteriormente (An. II).



Figura 4.21: Captação da nascente localizada na Serra Dormida - N7.



Figura 4.22: Captação da nascente localizada na Serra das Fontes - N13.

4.3.6.2. Poços

As concentrações de cloretos nos poços oscilam entre 23,75 mg/L e 104,58 mg/L. Este parâmetro no poço P1 apresenta-se estável entre os 47 mg/L e os 48mg/L, ao contrário dos

outros dois poços, que variam entre 23,75 mg/L e 104,58 mg/L no poço P2, e 37,93 mg/L a 98,20 mg/L no poço P3 (Tab. 4.7).

Segundo a carta de ocupação do território, os poços localizam-se numa área urbana. Constata-se que esta variação na concentração de cloretos deve-se à contaminação pelas fossas sépticas desta área urbana sobrejacente.

4.3.6.3. Furos

Os furos hidrotermais analisados apresentam uma elevada variação da concentração de cloretos (Tab. 4.11), esta apresenta-se por vezes entre: 2000 mg/L a 6000 mg/L; 15000 mg/L a 16000 mg/L; e 20000 mg/L a 50000 mg/L. Este facto está relacionado com as intrusões salinas, mas pontualmente a concentração de cloretos ultrapassam os 18980 mg/L da água dos oceanos (*Lenntech*⁴), refletindo as possíveis influências de “águas juvenis” ou emanações gasosas ricas em HCl.

De acordo com o Decreto-Lei n.º 152/2017, relativo à qualidade da água para consumo humano, o valor paramétrico de cloretos deverá ser igual deverá ser inferior a 250 mg/L. Todos os furos frios apresentam concentrações médias deste parâmetro superiores a 250 mg/L, exibindo apenas pontualmente valores abaixo destes. O furo F16 é o que apresenta concentrações mais elevadas na ordem dos 1700 mg/L.

4.3.6.4. Intrusão Salina

O aquífero basal corresponde a uma massa de água doce que sobrenada a água salgada proveniente de infiltrações do mar, dadas as diferenças de densidade. Entre estes dois corpos hídricos existe uma zona de transição ou de mistura onde a água é salobra, ou seja, apresenta elevados teores de cloretos.

O aquífero basal descarrega naturalmente ao longo da linha de costa e na Plataforma costeira submarina, estando sujeito à influência diária da maré e a fluxos geotérmicos. A exploração desta massa de água subterrânea, a partir de furos, para além de gerar um cone de rebaixamento no nível freático, induz na interface água doce - água salgada uma subida desta última, originando o chamado “*upwelling saline water*”, conforme o sugerido por Werner *et al.*, (2013) (Fig. 4.23).

Este fenómeno tende a ser agravado com o tempo de exploração destas massas de água subterrâneas, aumentando progressivamente o teor de cloretos (Rodrigues, 2002), e degradando a sua qualidade. Como referido no ponto anterior, a qualidade das águas

⁴ www.lenntech.com/composition-seawater.htm

captadas nos furos da ilha Graciosa apresenta teores de cloreto elevados que podem ser explicados por este fenómeno.

O processo de intrusão salina nos furos da ilha Graciosa pode estar associado aos seguintes fatores:

- Distância das captações ao mar - os furos dispõem-se entre 950 e 3200 m da linha de costa;

- Problemas Técnicos das captações - alguns dos furos penetram demasiado no aquífero basal; a bomba submersível está instalada abaixo do atual nível médio das águas do mar, bombeando a água salobra;

- Ineficiente gestão de água subterrânea - elevadas taxas de bombeamento; tempo excessivo de exploração;

O teor excessivo de cloretos na água devido ao processo de salinização tende a degradar os equipamentos, designadamente corroendo-os, gerando focos potenciais de contaminação microbiológica. Este facto explica o elevado número de furos em manutenção.

Os furos F11, F12 e F13 atravessam uma massa de água suspensa, a qual poderá estar a recarregar a massa de água basal. Este processo pode atenuar a intrusão salina e explicar os relativamente baixos teores de cloretos detetados na água (Tab. 4.11 e 4.12). O furo F9 também interceta uma massa de água subterrânea que durante o processo de perfuração foi detetada por alguns técnicos, localizada a 110 m de altitude, também tem um papel de recarga do aquífero basal.

Não obstante ser a perfuração mais afastada pelo oceano, o furo F16 apresenta elevada concentração de cloretos. Este facto pode ser explicado pela sua excessiva penetração na massa de água subterrânea basal, estando por isso mais sujeito fenómenos de subida da água do mar ("*upwelling saline water*") (Fig. 4.23). O enquadramento tectónico desta captação, disposta entre 2 falhas, faz com que a condutividade hidráulica seja elevada potenciando intrusão salina.

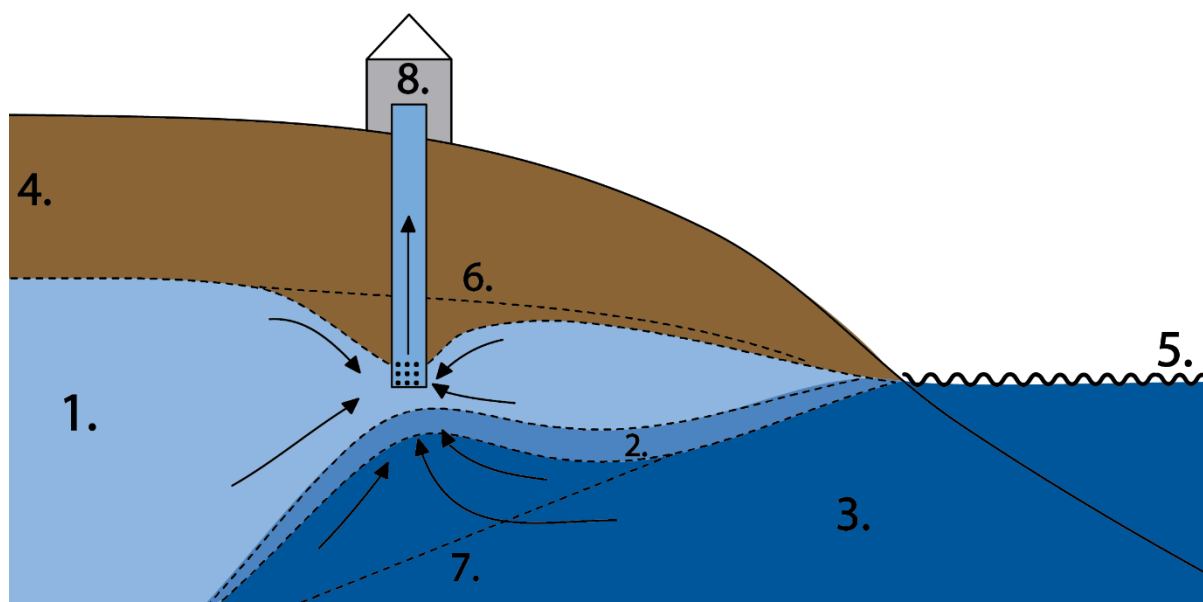


Figura 4.23: Esquema de uma captação por furo com o fenómeno da intrusão salina. (1. - Água doce; 2. - Zona de mistura, água salobra; 3. - Água salgada; 4. - Corpo insular; 5. - Nível do oceano; 6. Nível freático anterior à bombagem; 7. - Interface água salgada - Água de mistura anterior à bombagem; 8. - Casa da captação).

4.4. Caracterização Hidrogeológica do Meio Vulcânico

Este subcapítulo aborda o comportamento dos materiais vulcânicos do ponto de vista hidrogeológico. Os fatores que determinam a ocorrência, circulação e armazenamento de água subterrânea são a permeabilidade (k) e a porosidade (n) do meio rochoso, apresentando normalmente grandes variabilidades e complexidade a nível espacial. Neste trabalho, estes parâmetros são avaliados a nível qualitativo, tendo em conta o conhecimento das propriedades litológicas e estruturais dos maciços.

Do ponto de vista da água subterrânea, interessam sobretudo as formações com maior volumetria e mais extensas. As propriedades hidráulicas destas formações dependem sobretudo da sua natureza e estado de alteração (Serralheiro, 1990).

A dimensão das formações vulcânicas depende dos processos construtivos e destrutivos que afetam os meios insulares. Os primeiros estão associados aos diferentes episódios eruptivos, enquanto os segundos resultam dos intervalos de inatividade vulcânica, caracterizados pela ação erosiva, deposição e consolidação dos materiais. Estes, juntamente com os movimentos tectónicos, expressam-se por zonas de descontinuidades que podem impor barreiras hidráulicas à circulação de água ou, pelo contrário, construir caminhos de fluxos preferenciais (Rodrigues, 2002).

4.4.1. Caracterização Hidrogeológica das Formações Vulcânicas

A circulação e o armazenamento de água subterrânea nos materiais de natureza vulcânica dependem das suas características litológicas primárias, resultantes da gênese da própria rocha, e das secundárias, associadas a processos evolutivos subsequentes (Rodrigues, 2002). As características litológicas primárias relacionam-se com o volume, frequência e grau de associação de cavidades, poros e fissuras, sendo em regra responsáveis pelas propriedades hidráulicas das formações mais recentes. As características secundárias estão relacionadas com transformações químico-mineralógicas e textural-estruturais subsequentes, associadas a fenómenos de compactação, consolidação, alteração de minerais primários e deposição de minerais secundários (Rodrigues, 2002).

De acordo com Rodrigues (2002), quando o meio rochoso se encontra alterado, as características hidrogeológicas tornam-se dependentes da fraturação secundária, intrusão de filões e processos erosivos.

4.4.1.1. Escoadas Lávicas

As escoadas lávicas apresentam diferentes comportamentos hidrogeológicos, em função das suas características litológicas e dos processos de alteração a que estão sujeitas desde a sua formação. O grau de alteração da escoada tem também um papel fundamental na sua caracterização hidrodinâmica.

Em geral, as escoadas recentes, pouco alteradas, são tendencialmente permeáveis. De acordo com Rodrigues, (2002), a circulação e o armazenamento hídricos nestes materiais é condicionada pelas suas características primárias internas, designadamente pela presença de (a) diaclases verticais e horizontais; (b) tubos de lava e cavidades; (c) vesículas; (d) espaços intersticiais em *clinker* ou brecha; e (e) moldes de árvores.

(a) As diaclases verticais resultam de fenómenos de contração térmica, associados à solidificação das massas lávicas. Quando a dissipação térmica é lenta e as escoadas espessas, estas estruturas tendem a ser desenvolvidas, originando por vezes situações de disjunção colunar (Rodrigues 2002). Nestas circunstâncias a circulação dentro da escoada faz-se principalmente na vertical. A subsequente alteração do material rochoso origina fissuras horizontais (disjunção em lajes), paralelas à fluência da lava, fazendo-se a circulação ao longo da escoada.

A intensificação da alteração torna progressivamente a escoada menos permeável, devido a processos de argilificação, podendo chegar à impermeabilização quase total

(Serralheiro, 1990). De acordo com Prada (2000), as escoadas lávicas nessas condições assemelham-se ou a piroclastos basálticos (*s.l.*) ou a camadas de argila.

(b) As escoadas lávicas mais fluidas exibem, frequentemente, cavidades e tubos de lava de volumetria diversificada. Estas últimas estruturas podem atingir centenas de metros de comprimento, constituindo zonas preferenciais de circulação de água subterrânea, funcionando como drenos de forma semelhante às condutas cársicas, ainda que a gênese seja diferente.

(c) As vesículas são espaços intersticiais que surgem na massa rochosa. Resultam da libertação da fração volátil dissolvida nas lavas. Os principais fatores responsáveis pela sua ocorrência relacionam-se com a viscosidade dos magmas, quantidade de gases dissolvidos e volume do material emitido durante a erupção (Rodrigues, 2002).

(d) A presença de brechas no topo e base, resultantes da desgaseificação lávica origina níveis de *clinker*, os quais conferem à escoada grande porosidade e permeabilidade, criando zonas preferenciais de circulação e de armazenamento de água se o substrato inferior for impermeável (Serralheiro, 1990).

(e) Por vezes no seu trajeto, as escoadas lávicas englobam restos de vegetação, nomeadamente, troncos de árvores, os quais, após serem carbonizados, podem deixar espaços vazios correspondentes aos moldes residuais (Rodrigues, 2002).

Os processos de compactação resultam essencialmente de tensões criadas pela contínua sobreposição de materiais. Originam em regra o colapso das zonas menos resistentes das escoadas, como por exemplo, cavidades, vesículas, tubos de lava, zonas de brecha e ainda o encerramento total ou parcial de diáclases horizontais, reduzindo a permeabilidade e porosidade (Custodio & Llamas, 1976; Custodio, 1978 in Rodrigues, 2002).

4.4.1.2. Depósitos Piroclásticos

Os depósitos piroclásticos são constituídos por fragmentos resultantes diretamente do arrefecimento e solidificação do magma, bem como da fragmentação de rochas encaixantes, pré-existentes e já consolidadas (Nunes, 2002). De acordo com este autor, do ponto de vista genético, estes materiais podem agrupar-se em: piroclastos de queda e piroclastos de fluxo. De acordo com a sua granulometria, os primeiros englobam cinzas, *lapilli*, escória, bombas, pedra-pomes e blocos, enquanto os segundos incluem: escoadas piroclásticas e *lahars* (escoadas de lamas e detritos).

Os piroclastos de queda do tipo *lapilli*, escória e pedra-pomes, se pouco alterados, apresentam grande porosidade, com comportamento hidrogeológico semelhante ao das areias. Porém, a ocorrência de finos, por alteração ou arrastamento, conduz à colmatação dos vazios interclastos, reduzindo a porosidade e a permeabilidade dos depósitos.

Normalmente, as acumulações piroclásticas de queda do tipo escórias e *lapilli* dispõem-se em torno do centro emissor, ocupando uma área restrita (Rodrigues, 2002). A granulometria destes materiais apresenta-se muito variada, dispendo-se os materiais mais grosseiros junto do centro emissor, diminuindo a granulometria à medida que se afastam deste.

Os piroclastos de fluxo do tipo de escoadas piroclásticas, correspondentes a fluxos piroclásticos de alta densidade, incluem depósitos ignimbríticos, depósitos surtseanos e *lahars*. De acordo com Rodrigues (2002), a circulação de água nestas formações processa-se através de poros e, no caso dos depósitos se apresentarem muito consolidados, também a partir de fraturas. Ainda de acordo com este autor, estes materiais tendem a ser muito permeáveis apresentando, contudo, permeabilidades baixas se muito alterados.

Os depósitos freatomagmáticos são formados por clastos de granulometria variável, correspondendo os mais grosseiros a fragmentos líticos, predominando, contudo, as granulometrias finas. De acordo com Prada (2000), estes materiais caracterizam-se por um comportamento muito pouco permeável.

4.4.1.3. Depósitos Vulcano-Sedimentares

Os depósitos vulcano-sedimentares resultam da acumulação de sedimentos durante os períodos de acalmia vulcânica. São constituídos por materiais detríticos de natureza vulcânica acumulados no fundo dos vales, vertentes (depósitos de vertente) e leito das ribeiras (depósitos de ribeira). Estes, ao serem fossilizados por materiais vulcânicos emitidos posteriormente, podem originar níveis com elevada permeabilidade, podendo influenciar a hidrogeologia local em função da sua extensão (Prada, 2000). No caso destes depósitos se apresentarem consolidados ou dispostos numa matriz de elementos mais finos (brechas), a sua permeabilidade tende a ser, contudo, baixa Serralheiro (1990).

4.4.1.4. Paleossolos

Os paleossolos são formações pedológicas originadas nos períodos de acalmia vulcânica cobertas por materiais provenientes de erupções posteriores. Estes materiais apresentam-se normalmente constituídos por níveis amarelo-avermelhados de reduzida espessura, por vezes com grande extensão lateral. São constituídos por litofácies secundárias, resultantes de processos metamórficos, impostos pelo contacto com escoadas lávicas (Azevedo, 1998). Este último processo, designado de “cozimento” por Custodio (1978), Azevedo (1998) e Rodrigues (2002), gera importantes alterações ao nível mineralógico e

estrutural, que se manifestam por níveis avermelhados endurecidos, tratando-se de níveis praticamente impermeáveis.

De acordo com Azevedo (1998), estas alterações não resultaram apenas de fenómenos de metamorfismo, sendo também induzidas por modificações supergênicas decorrentes de uma prévia e prolongada exposição dos materiais aos agentes erosivos, antes da metamorfização.

A porosidade e a permeabilidade dos paleossolos é normalmente baixa, dependendo da sua espessura, granulometria das partículas, frequência de fraturas e dos graus de alteração e compactação (Rodrigues, 2002).

4.4.2. Caracterização Hidrogeológica das Estruturas Vulcânicas

4.4.2.1. Chaminés e Crateras Vulcânicas

As chaminés associadas a cones vulcânicos estabelecem a ligação entre a câmara magmática e a superfície (Cratera). Apresentam-se normalmente constituídas por materiais lávicos com uma porosidade baixa e disjunções junto à superfície, que acabam por desaparecer em profundidade (Serralheiro, 1990).

As crateras associadas a chaminés têm relevância no ponto de vista hidrogeológico dada a sua geomorfologia, especialmente se tiverem grandes dimensões, uma vez que constituem áreas de receção privilegiada da precipitação. Formam lagoas, constituindo importantes áreas de recarga subterrânea.

4.4.2.2. Filões e Outros Corpos Intrusivos

Os filões são corpos intrusivos tabulares implantados em fraturas. Quando densos, compactos e espessos, pouco permeáveis relativamente às rochas encaixantes, atuam como barreiras hidrogeológicas, compartimentando o meio rochoso em secções semi-estanques e condicionando a circulação horizontal de água subterrânea. A espessura, frequência e os processos de alteração físico-química e alteração térmica produzidas nas rochas encaixantes são determinantes neste processo (Rodrigues, 2002).

Nas situações em que a massa dos corpos intrusivos é mais permeável do que as rochas encaixantes, dada a sua fraturação, diaclasamento ou presença de fendas de retração, estas estruturas comportam-se como caminhos preferenciais de fluxo subterrâneo (Prada, 2000).

4.4.2.3. Falhas

As falhas que cortam os maciços podem ter comportamentos hidrogeológicos distintos, dependendo do seu preenchimento. No caso da caixa de falha se apresentar preenchida por materiais finos ou brechas, estas estruturas podem funcionar como barreiras hidrogeológicas, condicionando a hidrodinâmica subterrânea, se as formações intercetadas forem mais permeáveis. Em sentido inverso, Custodio (1978) refere que a proximidade ou intersecção de zonas de falha pode aumentar substancialmente a produtividade de galerias, poços e furos, ou seja, as zonas fraturadas correspondem a domínios com elevada condutividade hidráulica.

4.4.3. Caracterização Hidrogeológica das Formações da ilha Graciosa

Neste ponto pretende-se interpretar o comportamento hidrogeológico das formações locais, com base no exposto nos pontos anteriores e na caracterização geológica apresentada no Capítulo 3.

4.4.3.1. Complexo Vulcânico da Serra das Fontes

Esta unidade geológica é a mais antiga da ilha. Na sua generalidade é composta por escoadas lávicas subaéreas de natureza basáltica (*s.l.*), sendo também identificados depósitos vulcanoclásticos intercalados.

As escoadas desta formação apresentam uma estrutura compacta que impõe um comportamento impermeável à rocha, reforçado pela relativa antiguidade destes materiais. A presença de algumas escoadas com textura vesicular, com variações verticais e laterais, contribui localmente para o aumento da permeabilidade e porosidade da formação.

A presença de uma complexa rede de fraturas e filões regula a hidrodinâmica desta formação.

Os depósitos vulcanoclásticos apresentam um comportamento hidrogeológico diferenciado, dependendo da granulometria e grau de compactação. Quando consolidados, apresentam porosidades e permeabilidades relativamente baixas.

Em termos globais, podemos considerar que as escoadas lávicas têm uma porosidade moderada e uma condutividade hidráulica reduzida, enquanto que nos depósitos vulcanoclásticos estes parâmetros são moderados (Tab. 4.13).

4.4.3.2. Complexo Vulcânico da Serra Branca

Este Complexo encontra-se, maioritariamente, coberto pelas unidades mais recentes, tendo maior expressão na região da Serra Branca e na sua arribas costeiras. Caracteriza-se por evidenciar uma predominância de produtos vulcânicos mais evoluídos, incluindo espessas escoadas lávicas e numerosos depósitos vulcanoclásticos de natureza traquítica (s.l.).

As escoadas lávicas são espessas e compactas apresentando um grau de alteração elevado, o que em termos hidrogeológicos induz permeabilidades reduzidas. As brechas e os depósitos vulcanoclásticos tendem a apresentar uma porosidade muito reduzida, dada a sua natureza litológica e elevada compactação (Fig. 3.10).

4.4.3.3. Complexo Vulcânico de Vitória

O Complexo de Vitória comporta duas Unidades distintas - Unidade de Vitória e a Unidade do Vulcão Central - formados por escoadas lávicas e depósitos piroclásticos submarino e subaéreos de natureza basáltica (s.l.).

4.4.3.3.1. Unidade do Vulcão Central

As formações Pré-Caldeira constituídas por materiais de natureza surtseana (depósitos surtseanos), estromboliana (lavas e piroclastos) e hidromagmáticos (*surges*), apresentam porosidades e condutividades hidráulicas similares.

Os depósitos piroclásticos resultantes de atividade surtseana de natureza basáltica (s.l.), apresentam uma porosidade reduzida a muito reduzida. As formações subaéreas de natureza estromboliana apresentam-se muito compactas e alteradas, admitindo-se terem porosidades e condutividades hidráulicas reduzidas a muito reduzidas.

Dada a grande heterogeneidade granulométrica e complexidade estrutural, os depósitos hidromagmáticos apresentam uma porosidade moderada a reduzida, com níveis de permeabilidade muito restritos (Fig. 4.24).

Estes depósitos apresentam-se muito fraturados, admitindo-se a ocorrência de zonas preferenciais de fluxo de água subterrânea.

Os depósitos da Formação da Caldeira consolidados e não consolidados apresentam uma condutividade hidráulica heterogénea, que varia entre o reduzido, nos primeiros materiais, e o elevado, nos segundos.

Do ponto de vista hidrogeológico, a diferenciação da granulometria dos depósitos piroclásticos induz a porosidades elevadas junto do centro emissor, que vão diminuindo

progressivamente no sentido da orla costeira. Contudo, as escoadas lávicas apresentam uma porosidade moderada, uma vez que exibem uma textura vesicular.

As formações Pós-Caldeira têm um comportamento hidrogeológico diferenciado. Enquanto as escoadas lávicas de natureza basáltica (*s.l.*) associadas ao lago de lava apresentam porosidades moderadas a elevadas, as escoadas piroclásticas (*lahars*), as escoadas benmoreíticas, e os depósitos freatomagmáticos, exibem porosidades reduzidas ou muito reduzidas.

Do ponto de vista da condutividade hidráulica, as escoadas basálticas (*s.l.*) apresentam um comportamento reduzido, exceto nas situações onde ocorrem tubos de lava que funcionam como condutas hidráulicas, enquanto as restantes formações podem comportar-se como barreiras hidráulicas.

4.4.3.3.2. Unidade de Vitória

Esta Unidade é formada por piroclastos e escoadas lávicas de natureza basáltica (*s.l.*). De um modo geral, as escoadas lávicas apresentam uma textura vesicular, que induz uma porosidade moderada. A ocorrência de intercalações de depósitos detríticos indiferenciados incrementa provavelmente esta propriedade.

Os depósitos piroclásticos que ocorrem sob a forma de cones vulcânicos apresentam porosidades diferenciadas, sendo elevadas junto dos centros emissores e moderadas nos depósitos periféricos. Este facto é responsável por circulações de água subterrânea diferenciais.

Do ponto de vista da condutividade hidráulica, as escoadas têm um comportamento reduzido, enquanto os depósitos associados aos cones piroclásticos tendem para o elevado, embora nas suas periferias sejam moderadas a reduzidas.

4.4.3.4. Paleossolos

Os paleossolos identificados são caracterizados por apresentarem um nível argiloso compacto, com porosidades muito reduzida ou praticamente nulas e impermeável. A condutividade hidráulica nestes substratos faz-se sobretudo por fraturas ou falhas, comportando-se como uma barreira hidrogeológica.

4.4.3.5. Depósitos vulcanoclásticos de vertente

Os depósitos vulcanoclásticos de vertente têm especial importância na zona central da ilha, entre a Serra das Fontes e o Maciço Centro-Meridional. Do ponto de vista hidrogeológico,

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

estes materiais têm um comportamento heterogêneo, dependendo da granulometria. De um modo geral, as formações mais grosseiras e pouco litificadas tendem a ser muito permeáveis, enquanto as acumulações de materiais finos alterados são pouco permeáveis.



Figura 4.24: Exsurgência identificada nos níveis de lapilli intercalados nos níveis de cinza dos depósitos hidromagmáticos do período Pré-Caldeira - Nascente N3.

Tabela 4.13: Caracterização e classificação hidrogeológicas das Formações vulcânicas da ilha Graciosa.

| Unidade Geológica (Complexo - Formação) | | Porosidade | Condutividade hidráulica | Classificação hidrogeológica |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------|
| | Depósitos de vertente | Mo a R | Mo a R | Aquífero / Aquitardo |
| CVV-UV | Cones piroclásticos | ME | E | Aquífero / Aquifugo |
| | Escoadas | Mo | R | Aquífero / Aquitardo |
| CVV-UVC | Escoadas lávicas (associadas ao lago) | Mo a E | R ME | Aquífero / Aquitardo / Conduta Hidrogeológica |
| | Depósitos freatomagmáticos; escoadas benmoreíticas; e escoadas piroclásticas | R a MR | R a MR | Aquitardo / Barreira Hidrogeológica |
| | Sucessão escoadas e piroclastos | Mo a E | R a E | Aquífero / Aquitardo |
| | Depósitos hidromagmáticos | Mo a R | Mo a R | Aquífero / Aquitardo |
| | Depósitos submarinos | R a MR | R a MR | Aquitardo / Barreira Hidrogeológica |
| CVSB | Brechas e depósitos vulcanoclásticos | R | MR | Aquitardo /Aquicluso |
| | Escoadas traquíticas (s.l.) | R | R | Aquitardo |
| CVSF | Depósitos de cinza e <i>lapilli</i> | Mo a R | Mo a R | Aquífero / Aquitardo |
| | Escoadas lávicas | Mo | R | Aquitardo / Aquífero |
| | Paleossolos | MR | MR | Barreira Hidrogeológica |
| Falhas e filões | | E ou N | E ou N | Barreiras / Condutas Hidrogeológica |

Legenda:

CVV-UV: Complexo vulcânico de Vitória - Unidade de Vitória; CVV-UVC: Complexo Vulcânico de Vitória - Unidade do Vulcão Central; CVSB: Complexo Vulcânico da Serra Branca; CVSF: Complexo Vulcânico da Serra das Fontes

ME - muito elevada E - elevada Mo - moderada R - reduzida

MR - muito reduzida N - aproximadamente nula

4.5. Domínios Hidrogeológicos Insulares

No presente estudo entende-se por **domínio hidrogeológico** o domínio espacial constituído por um conjunto de unidades ou formações geológicas com continuidade espacial e que, do ponto de vista hidrogeológico, apresentam uma hidrodinâmica subterrânea e uma hidrogeoquímica diferenciada.

As condições de ocorrência, armazenamento e circulação das águas subterrâneas estão diretamente associadas às características litológicas e estruturais do meio geológico. A divisão da ilha Graciosa em Domínios e Subdomínios hidrogeológicos, apresentada na Fig. 4.25, tem como objetivos principais: (1) a caracterização mais detalhada da hidrogeologia insular e (2) a definição dos setores com maiores potencialidades aquíferas, ou seja, mais favoráveis para a captação e exploração de águas subterrâneas.

Foram delimitados dois grandes domínios hidrogeológicos (Domínio I e II), cada um dos quais se subdivide em dois subdomínios (Subdomínio I-1 e I-2 e II-1 e II-2). A sua delimitação teve como base a geomorfologia, geologia, vulcano-estratigrafia e hidrologia.

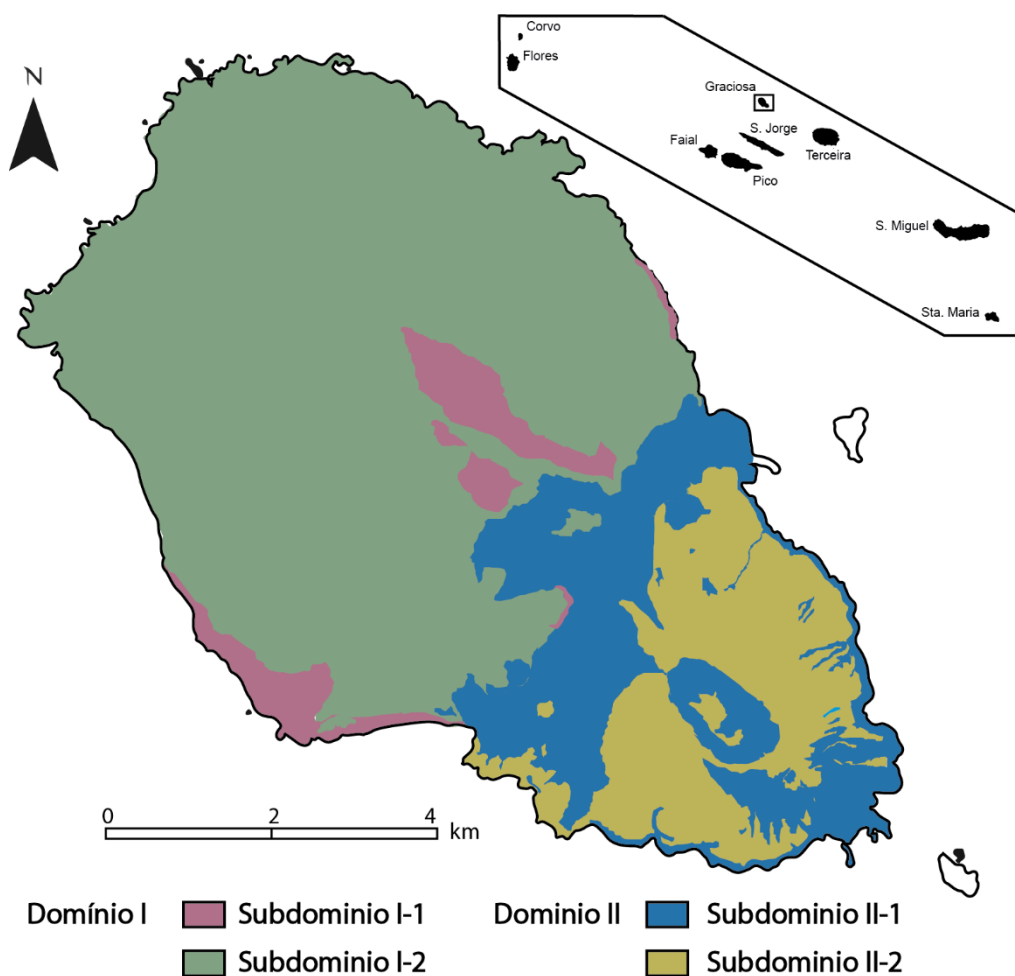


Figura 4.25: Domínios e subdomínios hidrogeológicos propostos para a ilha Graciosa.

4.5.1. Domínio Hidrogeológico I

Ocupa a região central e NW da ilha que inclui o Complexo Vulcânico da Serra das Fontes, o Complexo Vulcânico da Serra Branca e a Unidade de Vitória do Complexo Vulcânico de Vitória. Este domínio encontra-se muito fraturado por falhas e lineamentos tectónicos, que constituem importantes condutas ou barreira hidrogeológicas.

Este subdivide-se em 2 subdomínios (subdomínio I-1 e subdomínio I-2), em grande parte separados pela presença de um paleossolo que se formou há cerca de 150 000 anos (Larrea, 2014). Este estrato é um importante marco na hidrogeologia, dada a sua extensão e pouca permeabilidade.

4.5.1.1. Subdomínio Hidrogeológico I-1

Este Subdomínio, constituído por escoadas de natureza basáltica (*s.l.*) e traquítica (*s.l.*), forma o Complexo da Serra das Fontes e o Complexo da Serra Branca, considerados os mais antigos da ilha. Representam a base do edifício insular, aflorando no cume da Serra das Fontes, na região central do *graben* e na Costa SW do Maciço centro-Meridional.

A nível hidrogeológico, estes materiais apresentam porosidades moderadas a reduzidas e condutividades hidráulicas entre o moderado e o muito reduzido, podendo considerar-se aquíferos ou barreiras hidrogeológicas. Ocasionalmente há ocorrência de pequenos aquíferos descontínuos, associados a formações de cinza e *lapilli* e a fissuras ou falhas.

A recarga deste subdomínio faz-se por infiltração na área aflorante da Serra das Fontes, podendo também fazer-se infiltração profunda nas regiões cobertas por outras unidades, a qual é sobretudo conduzida por fraturas. A água presente neste subdomínio descarrega a partir de 11 nascentes e é intercetada por 10 furos.

4.5.1.2. Subdomínio Hidrogeológico I-2

Este subdomínio é composto por escoadas lávicas de natureza basáltica (*s.l.*) extensas e depósitos piroclásticos da Unidade de Vitória do Complexo Vulcânico de Vitória. É o que apresenta maiores dimensões, abrangendo toda a área NW da ilha e cobrindo ainda o Maciço Centro-Meridional e a parte NE da Serra das Fontes.

A nível hidrogeológico, este subdomínio poderá ser dividido em dois grupos:

- Grupo dos depósitos piroclásticos, dispostos em torno dos cones vulcânicos, que apresentam porosidades muito elevadas e permeabilidades elevadas, classificando-se como aquíferos livres e, dada a porosidade, também como aquíferos;

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

- Grupo das escoadas lávicas consideradas aquíferos devido à sua porosidade moderada e permeabilidade reduzida.

Associado a este subdomínio ocorrem vários sistemas aquíferos suspensos dispersos, recarregados por infiltração da precipitação. A descarga destes sistemas faz-se por nascentes, exceto no aquífero suspenso semi-confinado localizado na Plataforma NW que descarrega para o aquífero basal.

4.5.2. Domínio Hidrogeológico II

Ocupa a região SE da ilha, usualmente denominada de Caldeira, subdividindo-se em dois Subdomínios distintos.

O subdomínio II-1 dispõe-se na base do cone vulcânico da Caldeira e no limite NW deste domínio, sendo composto pela formação dos períodos Pré-Caldeira e Formação da Caldeira, da unidade do vulcão Central do Complexo Vulcânico da Caldeira. O subdomínio II-2 localiza-se na área aflorante da Caldeira, formado no período Pós-Caldeira da mesma unidade.

No interior da Caldeira, apesar das escoadas associadas ao lago de lava serem porosas e pouco permeáveis, a chaminé vulcânica tem provavelmente uma função de barreira hidrogeológica, dados os fenómenos de abatimento e compactação associados à sua formação. Posto isto, a circulação subterrânea é fundamentalmente dominada por falhas e fraturas.

Os depósitos de vertente, localizados na base das paredes internas da Caldeira, podem condicionar a infiltração da precipitação no subdomínio II-1, dependendo da granulometria e compactação, conferindo uma porosidade e permeabilidade entre moderada a reduzida.

4.5.2.1. Subdomínio Hidrogeológico II-1

Este subdomínio é composto por uma sucessão de escoadas lávicas de natureza basáltica (*s.l.*) intercaladas com depósitos de piroclastos de queda, uns de natureza basáltica (*s.l.*) e outros de natureza traquítica (*s.l.*). Estes materiais formam as arribas costeiras SE da ilha, ocorrendo também na vertente NW da Caldeira e, de forma esporádica, na faixa entre a Caldeira e a costa (fig. 4.24).

A nível hidrogeológico, este subdomínio poderia ser dividido em três grupos distintos:

- Grupo dos depósitos resultantes das erupções submarinas, presentes na base do cone vulcânico, que apresentam possivelmente porosidades e permeabilidades reduzidas a nulas, comportando-se como barreira hidrogeológica;

- Grupo das escoadas lávicas que tem um comportamento de aquíferos ou aquíferos devido às suas porosidades moderadas e condutividades hidráulicas reduzidas;

- Grupo dos piroclastos subaéreos, que apresenta uma granulometria distinta entre camadas, variando entre escórias a cinzas, o que lhes confere uma porosidade e permeabilidade entre o muito elevado e o reduzido. A classificação hidrogeológica deste grupo, dependendo das camadas, varia entre aquífero, aquífero ou aquífero.

A recarga deste subdomínio faz-se preferencialmente no interior da Caldeira, ocorrendo também na vertente NW deste Maciço. A descarga natural é realizada através das 2 nascentes basais que ocorrem na extremidade SE da ilha e por 4 exurgências presentes nas vertentes da Caldeira. A descarga induzida é realizada por 6 furos e 1 poço, que captam o aquífero basal.

4.5.2.2. Subdomínio Hidrogeológico II-2

Este subdomínio é o que apresenta menor volume, comportando uma camada superficial de depósitos piroclásticos de fluxo de estrutura compacta, com cinzas (*lahars*), e domos traquíticos (*s.l.*). Apresenta um comportamento essencialmente impermeável, refletido na densa rede hidrográfica radial que se desenvolve nas vertentes da Caldeira, tendendo a funcionar como barreira hidrogeológica ou aquífero.

5. Modelo Hidrogeológico Conceptual da Ilha Graciosa

Conclusões e Recomendações

A hidrogeologia de ambientes vulcânicos insulares apresenta particularidades únicas, o que motivou diversos autores a desenvolverem modelos hidrogeológicos específicos. Constituem bons exemplos os modelos apresentados para os Arquipélagos do Havai, Canárias, Madeira, Açores e Polinésia Francesa. A variabilidade de modelos deve-se aos diferentes processos construtivos de cada ilha, responsáveis pelas distintas características geomorfológicas, cronostratigráficas e geológicas. Estas apresentam, contudo, algumas semelhanças quanto ao comportamento hídrico nas unidades geológicas presentes.

5.1. Modelo Hidrogeológico Conceptual

No sentido de expressar melhor a proposta de Modelo hidrogeológico conceptual do domínio em estudo foram realizados 4 perfis (Fig. 5.1). Os perfis hidrogeológicos basearam-se nos conhecimentos geológicos adquiridos, nomeadamente nos elementos da Carta Vulcano-estratigráfica da ilha Graciosa de Gaspar & Queiroz (1995), na Carta tectónico-estrutural de Hipólito (2009), nos elementos geomorfológicos e hidroclimatológicos, assim como na caracterização hidrogeológica da ilha apresentada no subcapítulo 4.4.

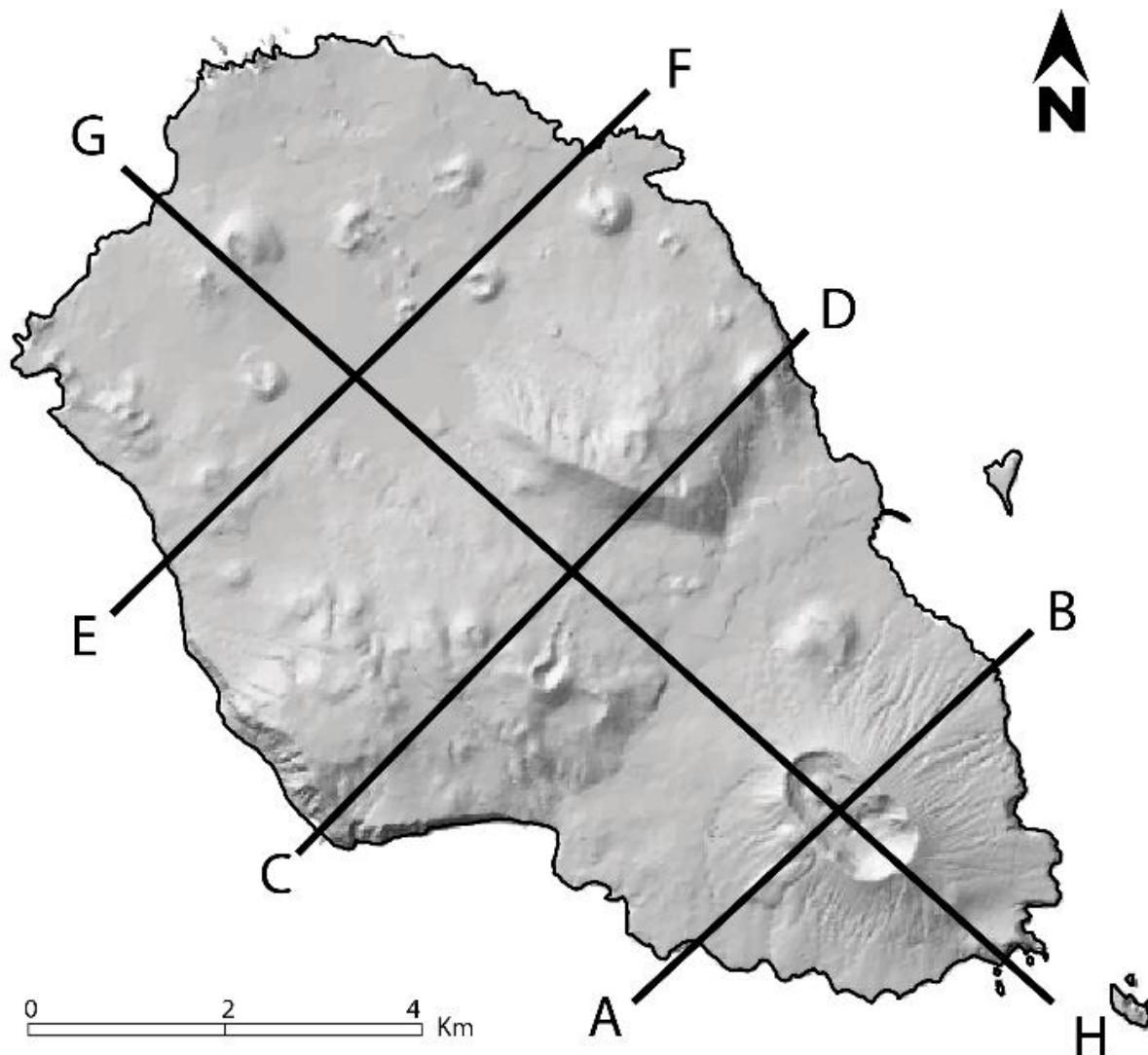


Figura 0.1: Localização dos perfis hidrogeológicos integrantes do Modelo hidrogeológico conceptual proposto para a ilha Graciosa.

Seguidamente, apresenta-se a descrição dos 3 segmentos gerais do Modelo hidrogeológico proposto: recarga aquífera; circulação-armazenamento subterrâneos (hidrodinâmica subterrânea); descarga aquífera.

5.1.1. Recarga Aquífera

As unidades aquíferas (suspensas e basais) e as massas de água da ilha são fundamentalmente “alimentadas” por processos naturais. Neste conjunto, destaca-se a infiltração e a infiltração profunda associadas à precipitação atmosférica. Na generalidade das ilhas do Arquipélago dos Açores, a precipitação concentra-se nos domínios interiores e de maior altitude. A ilha Graciosa apresenta dimensões reduzidas e baixas altitudes, o que

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

confere baixos níveis de precipitação, havendo assim uma reduzida entrada hídrica anual no sistema hidrogeológico insular.

Do ponto de vista hidrogeológico, a Plataforma NW da ilha Graciosa é a região que comporta maior capacidade de recarga, apresentando elevada infiltração nos cones vulcânicos, de natureza piroclásticas, e no centro da Plataforma, com depósito de detritos de natureza basáltica (*s.l.*). A região ocidental (vertente E da Serra das Fontes) apresenta uma capacidade de recarga elevada a moderada, proporcionada pelas escoadas recentes da Unidade de Vitória. Na extremidade SE da ilha domina a recarga moderada a reduzida, porque a área exposta que possibilita a infiltração da precipitação é escassa. As regiões de recarga muito reduzida localizam-se principalmente na faixa entre a Caldeira e a costa.

Considerando o âmbito territorial dos domínios hidrogeológicos, constata-se que as capacidades de recarga elevada a muito elevada correspondem ao subdomínio I-1; as recargas moderadas a reduzidas ao subdomínio II-1; quanto às de recarga reduzidas a muito reduzidas são o subdomínio II-2.

Para além da recarga associada à precipitação atmosférica, algumas massas de água subterrâneas são “alimentadas” com: (1) águas juvenis; (2) água do mar (intrusões salinas) e (3) águas superficiais, nomeadamente a partir de lagoas ou charcos.

Particularmente ocorre recarga aquífera induzida (não-natural), principalmente na Plataforma NW da ilha, onde infiltra o excedente da irrigação agrícola (nas áreas de usos de solo agrícolas), e a partir de descargas (fugas) das fossas sépticas.

5.1.2. Hidrodinâmica Subterrânea

Com base nos perfis geológicos e nos perfis hidrogeológicos propostos, a circulação hídrica subterrânea realiza-se essencialmente de forma rápida pelas fraturas e/ou falhas e de uma forma mais lenta nos níveis de tufos e de paleossolos.

5.1.2.1. Domínio hidrogeológico I

Os cones de piroclastos apresentam circulação vertical rápida que possibilita a infiltração profunda.

Nas escoadas com porosidade moderada ocorre circulação sub-horizontal, com velocidade lenta a moderada e, quando encontra níveis inferiores com estruturas permeáveis, possibilita infiltração profunda.

No Complexo Vulcânico da Serra das Fontes a circulação hídrica ocorre essencialmente na cobertura meteorizada e erodida desta serra e, particularmente, na base deste Complexo

podem ocorrer regiões com maiores condutividades hidráulicas, devido a uma maior fraturação. De um modo geral, à semelhança do Complexo Vulcânico da Serra Branca, o fluxo subterrâneo efetua-se fundamentalmente por falhas.

As escoadas mais recentes deste domínio apresentam uma circulação sub-horizontal condicionada pelos alinhamentos tectónicos.

Neste domínio, junto do alinhamento tectónico do *graben*, evidenciam-se fluxos de águas juvenis (águas mantélicas produzidas principalmente nas dorsais oceânicas e pontos quentes).

5.1.2.2. Domínio hidrogeológico II

A circulação é radial e faz-se de forma sub-horizontal do interior da Caldeira para a costa, possibilitando a infiltração através das escoadas para níveis inferiores, pois têm um comportamento de aquíferos. Também há circulação vertical pelas fraturas, as quais também se dispõem de forma radial.

Neste Domínio ocorre uma importante ascensão e circulação de águas juvenis, associadas às falhas com o mesmo alinhamento tectónico do Rife da Terceira.

A circulação no sentido da Caldeira para o interior da ilha (SE para NW) efetua-se de forma sub-horizontal, com um comportamento de condutividade hidráulica moderado, promovendo a acumulação de importantes massas de água no contacto dos dois Domínios hidrogeológicos (Fig. 5.5).

Neste domínio, a circulação da água do oceano nos aquíferos basais faz-se apenas na periferia da Caldeira.

5.1.3. Descarga Aquífera

A descarga das massas de água subterrâneas efetua-se através de processos naturais e induzidos.

No primeiro grupo incluem-se as nascentes, localizadas a diferentes altitudes se associadas a aquíferos suspensos, ou na orla costeira ou na zona intertidal se associadas ao aquífero basal.

As nascentes associadas a aquíferos suspensos apresentam no geral, caudais diminutos, que apresentam grandes variações sazonais em função da precipitação. Como já foi referido, este facto reflete: (1) pequenas dimensões aquíferas e/ou (2) baixas capacidades de armazenamento.

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

Não foi possível determinar caudais das nascentes basais, dada a sua localização na linha de costa entre marés. Contudo, de acordo com informações obtidas junto de habitantes locais, existem numerosas descargas submarinas, sobretudo na zona SE da Caldeira.

No grupo de processos induzidos incluem-se as captações diretas de águas subterrâneas através de poços e furos.

Os poços que intercetam os aquíferos suspensos localizam-se na Plataforma NW, não sendo atualmente captados. Um dos poços interceta o aquífero basal, muito próximo da linha de costa, e também não é captado.

Os furos localizam-se um pouco por toda a ilha e estão associados a aquíferos basais. A capacidade de extração de água a partir destas infraestruturas é elevada, sendo superiores aos restantes pontos de descargas.

5.2. Conclusões

A ilha Graciosa é constituída por 3 complexos vulcânicos distintos, que do ponto de vista cronológico apresentam-se da seguinte ordem: o Complexo Vulcânico da Serra das Fontes; Complexo Vulcânico da Serra Branca; e o Complexo Vulcânico de Vitória - Vulcão Central. Estes são basicamente constituídos por escoadas lávicas basálticas (s.l.) e traquíticas (s.l.), depósitos piroclásticos associados de queda e/ou de fluxo e, refletindo períodos de acalmia vulcânica, dois paleossolos principais. Do ponto de vista hidrogeológico, estes materiais apresentam porosidades e condutividades hidráulicas muito diferenciadas, induzindo no meio insular uma grande heterogeneidade.

Com base nas características geológicas, vulcano-estratigráficas, geomorfológicas, tectónicas, geocronológicas, climáticas e hidrogeológicas, foi possível individualizar na ilha dois domínios hidrogeológicos distintos, definidos pela hidrodinâmica subterrânea inferida. Ambos estes domínios foram subdivididos em dois subdomínios diferenciados por apresentarem processos de ocorrência, circulação e armazenamento de água próprios.

Estes domínios apresentam recargas por infiltração e infiltração profunda, que ocorre preferencialmente nas zonas topograficamente mais elevadas e acidentadas da ilha, e do ponto vista geológico, formadas por escoadas basálticas (s.l.) recentes e depósitos piroclásticos de queda.

Foram identificadas, nos diferentes domínios hidrogeológicos, massas de água subterrâneas associadas a pontos de descarga naturais (nascentes) e induzidos (poços e furos). A água das nascentes e furos localizados no setor SE da Caldeira e de uma nascente localizada no extremo NW da ilha são hidrotermais, com influências oceânicas e, provavelmente, de águas juvenis. À exceção de um furo localizado na Plataforma NW, que

capta águas juvenis, os restantes captam águas “frias”, salobras e salgadas. As águas das exsurgências e poços associados a aquíferos suspensos são doces e “frias”.

Apesar de ocorrerem vários aquíferos suspensos na ilha, o maior armazenamento hídrico subterrâneo situa-se em setores da base. Estes são essencialmente compartimentados por litologias pouco permeáveis e pela tectónica.

Admite-se que a circulação hídrica se faz predominantemente com orientação geral NW-SE, ocorrendo em toda a ilha e a diferentes profundidades, exceto no limite dos dois domínios hidrogeológicos.

A análise dos registos de condutividade elétrica e cloretos na água captada nos furos aponta para processos de intrusão salina nos aquíferos basais. Este fenómeno é agravado com o tempo de exploração das massas de água subterrâneas, degradando a sua qualidade e refletindo uma subida da zona de mistura água doce-água salgada.

5.3. Recomendações

Tendo por base os conhecimentos adquiridos e as conclusões acima expostas, recomenda-se:

(1) A realização de mais estudos tendo em vista o conhecimento mais detalhado da hidrogeologia insular e da intrusão salina no aquífero basal, nomeadamente a realização de ensaios de caudal para determinar a evolução da cunha salina face aos caudais e ao tempo de exploração. Estes ensaios poderão ser eventualmente complementados com estudos de carácter geofísico (prospecção elétrica), com o objetivo de caracterizar a cunha salina;

(2) Realização de ensaios de caudal no aquífero suspenso da Plataforma NW, com o objetivo de determinar as suas potencialidades;

(3) A elaboração de um plano de gestão água ao nível da ilha que tenha em conta os resultados dos estudos propostos no ponto (1) de forma a melhorar a qualidade das águas captadas e seleccionar o seu uso.

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

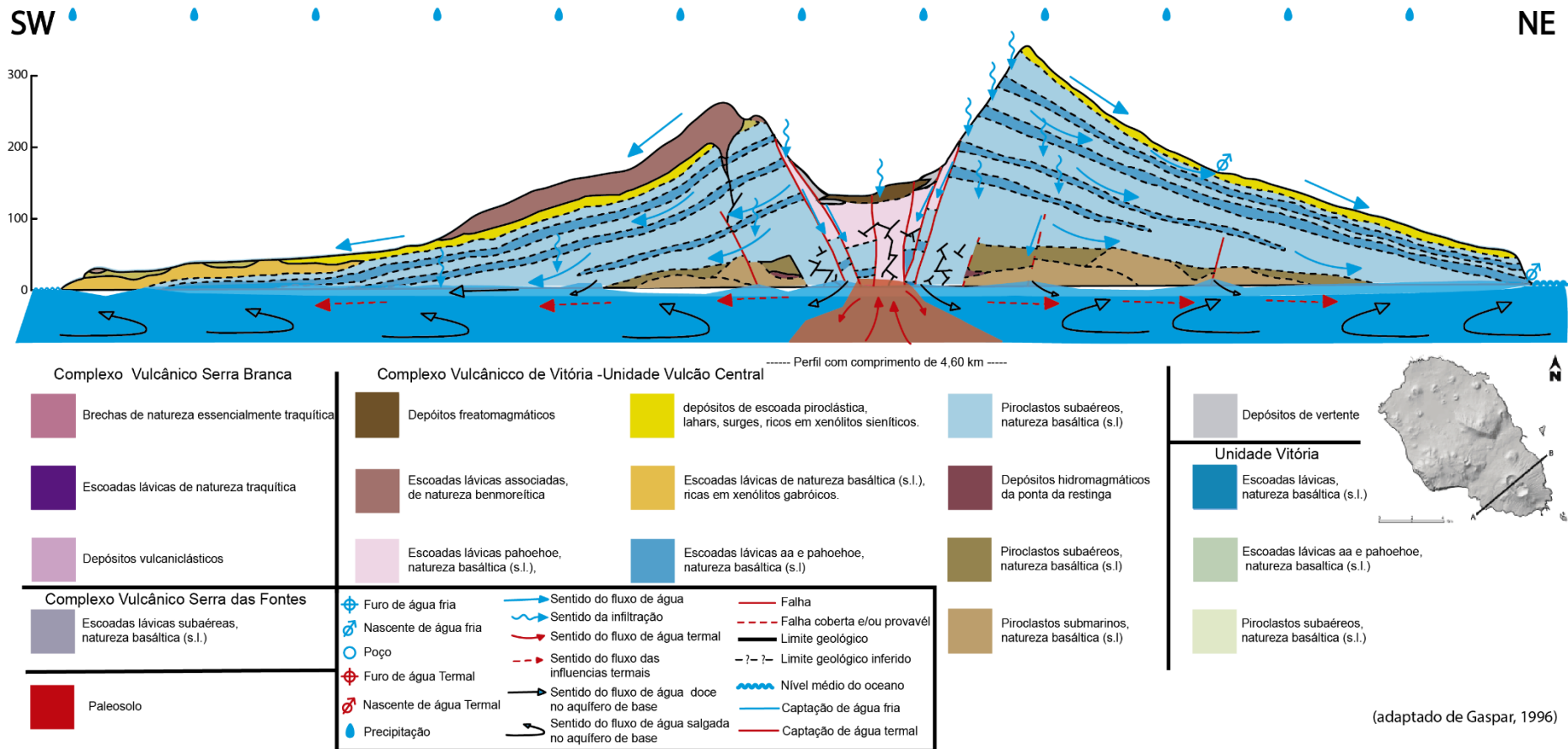
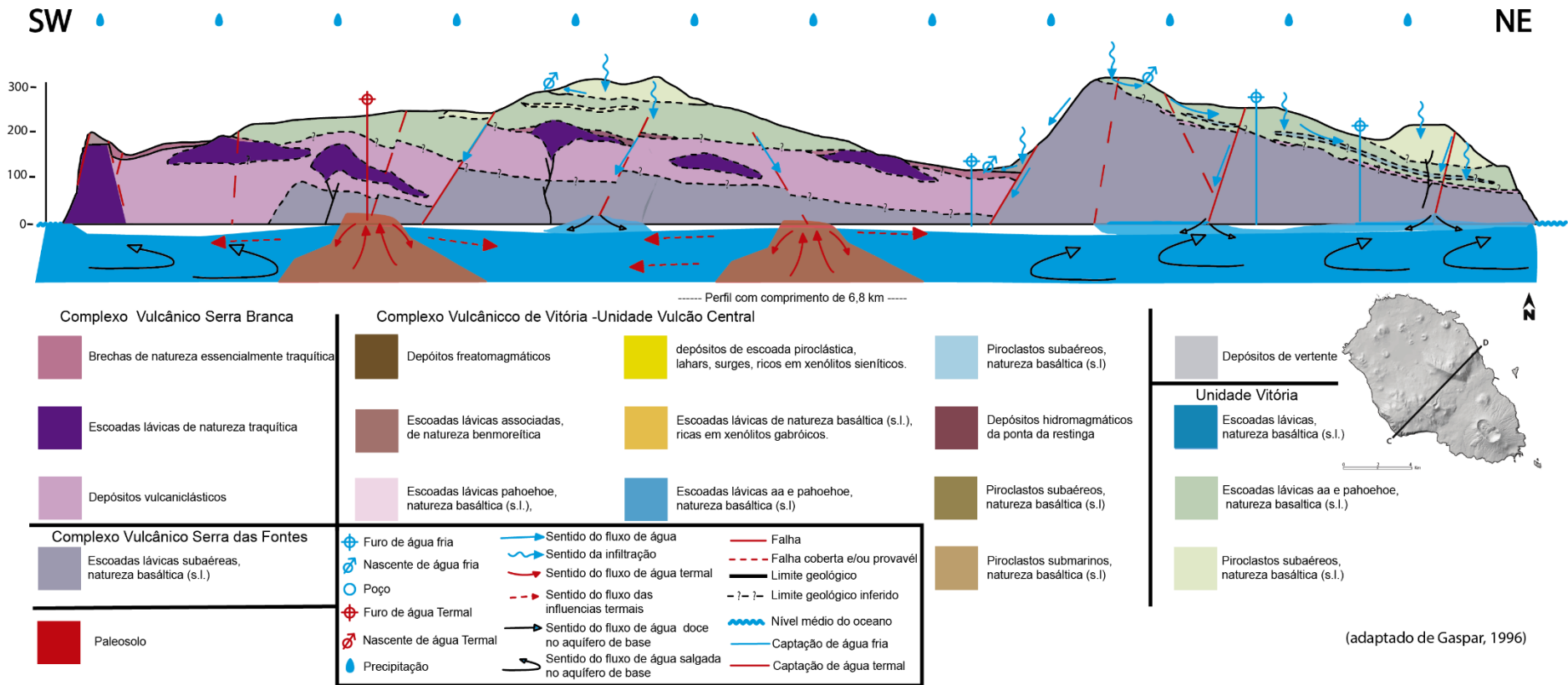


Figura 0.2: Perfil hidrogeológico conceptual (A-B) proposto para a ilha Graciosa (localização na Fig. 5.1).



HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

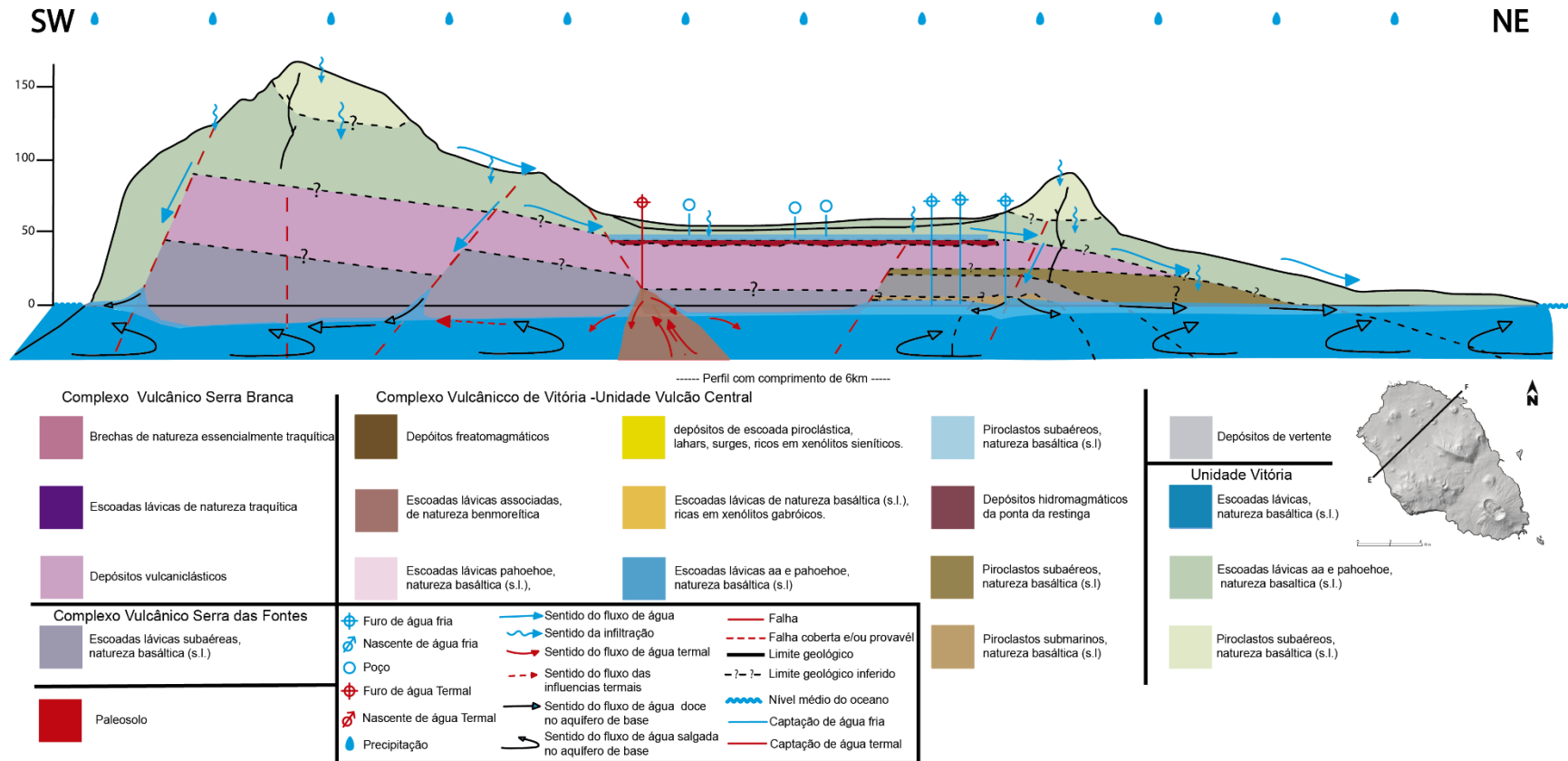


Figura 0.4: Perfil hidrogeológico conceptual (E-F) proposto para a ilha Graciosa (localização na Fig. 5.1).

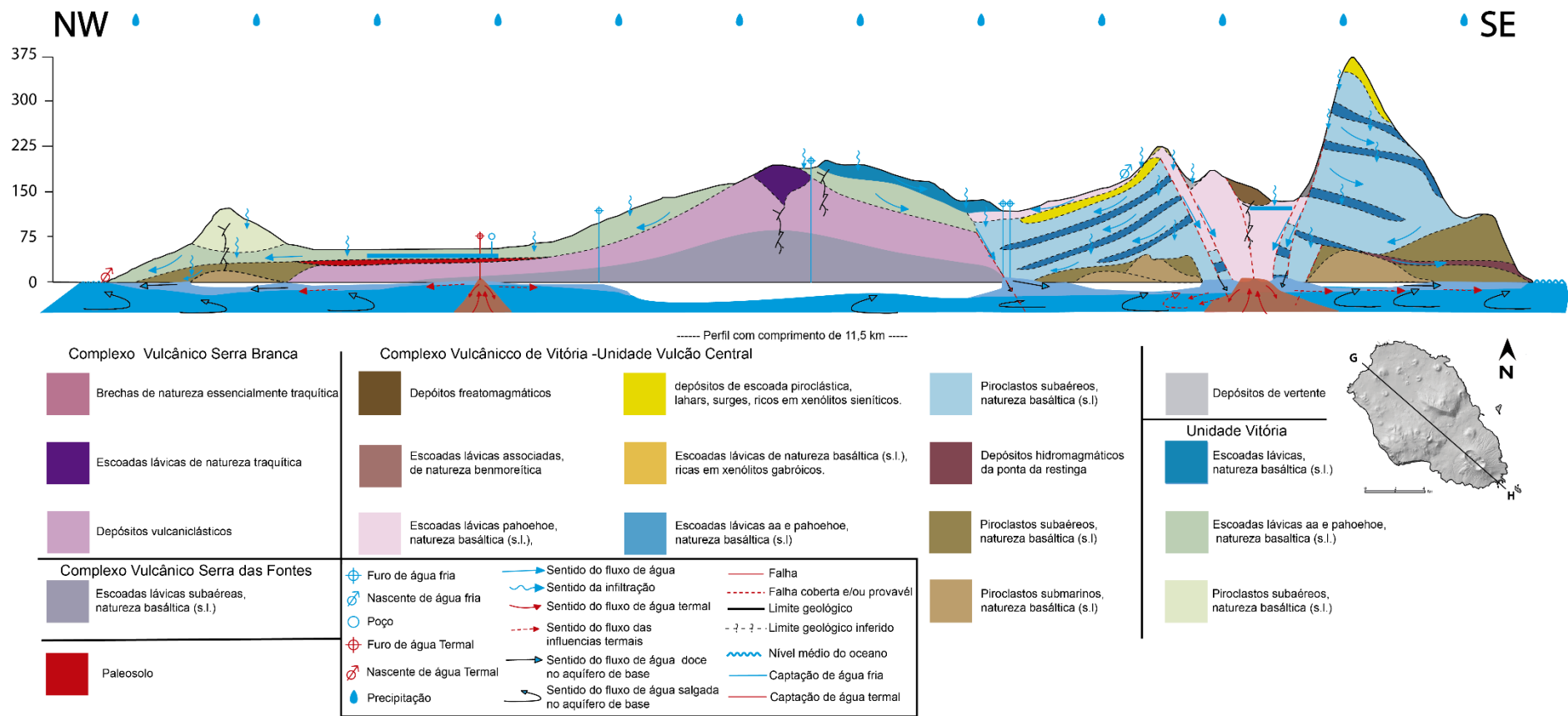


Figura 0.5: Perfil hidrogeológico conceptual (G-H) proposto para a ilha Graciosa (localização na Fig. 5.1).

Bibliografia

- AHA/DRA. (2015). Plano de Gestão da Região Hidrográfica dos Açores - RH9. Versão para consulta pública. AHA-DRA, Ponta Delgada.
- Antunes, P. C. P. (2008). Estudo hidrogeoquímico e vulcanológico de lagos no Arquipélago dos açores: aplicações para a mitigação de riscos naturais. Dissertação de doutoramento no ramo de geologia especialidade de hidrogeologia. Universidades dos Açores. 485 pp.
- Azevedo, E. B. (2015). O Clima dos Açores - Monografia. Centro do clima, Meteorologia e mudanças globais da universidade dos Açores. www.climaat.angra.uac.pt . DOI: 10.13140/RG.2.1.2075.1200.
- Azevedo, J. M. M. & Ferreira, M. R. P. (1998). Condições de ocorrência e funções hidrogeológicas das lagoas em pequenas ilhas vulcânicas: o exemplo da ilha das Flores, Açores. 4º Congresso da Água "A água como recurso estruturante do desenvolvimento", Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, 8p.
- Azevedo, J. M. M. & Ferreira, M. R. P. (1998). *Volcanic gaps and subaerial records of palaeo-sea-levels on Flores Island (Azores): tectonic and morphological implications.* - *Journal of Geodynamics*, 28, 117-129.
- Azevedo, J. M. M. & Ferreira, P. M.R. (2006). *The Volcano-tectonic evolution of Flores Island, Azores (Portugal)* - *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 156, 90-112.
- Azevedo, J. M. M. (2002). Conceptualizações Hidrogeológicas em pequenos domínios insulares: o exemplo da ilha das Flores, Açores. 6.º Congresso da água, Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, 1p.
- Azevedo, J.M.M. (1988). Depósitos vulcanoclásticos submarinos: caso de estudo da ilha das Flores, Açores. - Provas de Aptidão Científica e Pedagógica - Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 198 p.
- Azevedo, J.M.M. (1998). Geologia e Hidrogeologia da Ilha das Flores (Açores, Portugal) - Tese de doutoramento - Departamento de Ciências da Terra. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra. Vol: 1 & 2, 403 p.
- Azevedo, J.M.M. (1998). Geologia e Hidrogeologia da ilha das Flores (Açores - Portugal). Tese de Doutoramento em Hidrogeologia. Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra. Vol 1; 140 p.
- Bruno, J. (2010). "Arquitetura da água na Ilha Graciosa" in "Inventário do Património Imóvel dos Açores". Direção Regional da Cultura. Angra do Heroísmo.
- Carreira, P. M., Carvalho, M. R., Nunes, J. C., Grassa, F., Capasso, G., Marques, J. M. (2017). *Preliminary geochemical and isotopic results in thermal and cold waters of Graciosa*

- volcanic Island (Azores). Procedia Earth and Planetary Science* 17 (2017) 630-633. *15th Water-Rock Interaction International Symposium*, WRI-15. doi: 10.1016/j.proeps.2016.12.169.
- Cruz, J. V. e França, Z. (2006). *Hydrogeochemistry of thermal and mineral springs of the Azores archipelago (Portugal). J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 151, 382-398.
- Cruz, J. V., Andrade, C. (2017). Groundwater salinization in Graciosa and Pico islands (Azores archipelago, Portugal): processes and impacts. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 12 (2017) 69-87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.04.003>.
- Cruz, J. V., Andrade, C., Coutinho, R. (2014). Estado químico das massas de água subterrânea nas ilhas do Grupo Central do Arquipélago dos Açores (Portugal). *Comunicações Geológicas* 101, Especial II, 665-670, ISSN: 0873-948X; e-ISSN: 1647-581.
- Cruz, J. V., Fontiela, J., Prada, S., Andrade, C. (2014). *The chemical status of groundwater and pollution risk in the Azores archipelago (Portugal). Environmental Earth Sciences, Springer*. DOI 10.1007/s12665-014-3407-2.
- Cruz, J. V., Freire, P., Costa, A. (2010). *Mineral waters characterization in the Azores archipelago (Portugal). J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 190, 353-364.
- Cruz, J.V., Amaral, C. (2004). Major ion chemistry of groundwaters from perched-water bodies at Azores (Portugal) volcanic archipelago. *Appl. Geochem.* 19, 445-459.
- Cruz, J.V., Coutinho, R., Pacheco, D., Cymbron, R., Antunes, P., Freire, P., Mendes, S. (2011). Groundwater salinization in the Azores archipelago (Portugal). *Environmental Earth Sciences*, 62, 1273-1285.
- Custódio, E. & Llamas, M.R. (1976). *Hidrologia Subterrânea - Ed. Omega, Barcelona; L.L.*
- DROTRH, IA. (2001). Plano Regional da Água - Relatório Técnico - versão para consulta pública. Ed. Secretaria Regional do Ambiente, Direção regional do Ordenamento do Território e dos Recursos Hídricos, 414 p.
- Féraud, G., Kaneoka, I., Allégre, C. J. (1980). K/Ar ages and stress pattern in the Azores: geodynamic implications. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 46, 275-286.
- Ferguson, G., Gleeson, T. (2012). Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nat. Clim. Change* 2, 342-345.
- França, Z., Cruz J.V., Nunes J.C., e Forjaz V.H. (2003). Geologia dos Açores: uma perspectiva actual. *Açoreana* 10 (1); 11-140.
- Freire, P. A. T. (2013). Recursos Hidrominerais dos Açores: Hidrogeologia e avaliação do potencial socioeconómico. Dissertação de doutoramento no ramo de geologia especialidade de hidrogeologia. Universidades dos Açores. 611 pp.

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

- Gaspar, J. L. (1996). Ilha Graciosa (Açores): História Vulcanológica e Avaliação do Hazard. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia. Departamento Geociências, Universidade dos Açores, 361p.
- Gaspar, J. L., Queiroz, G. (1995). Carta vulcanológica dos Açores, ilha Graciosa. Folhas A e B, na escala 1:10 000. Ed. Universidade dos Açores, Centro de Vulcanologia da U.A., Câmara Municipal de Santa Cruz da Graciosa.
- Hipólito, A. (2009). Geologia estrutural da Ilha Graciosa: Enquadramento no âmbito da Junção Tripla dos Açores. *MSc thesis Azores University, Ponta Delgada* (257 pp.).
- Hipólito, A., Madeira, J., Carmo, R., Gaspar, J. L. (2013). *Neotectonics of Graciosa island (Azores): a contribution to seismic hazard assessment of a volcanic area in a complex geodynamic setting*. *Annals Of Geophysics*, 56, 6, 2013, S0677; doi:10.4401/ag-6222
- Hipólito, A., Madeira, J., Carmo, R., Gaspar, J.L. (2011). *Neotectonics of Graciosa Island (Azores)—uncertainty in seismic hazard assessment in a volcanic area with variable slip-rates*. *2nd INQUA-IGCP-567 International Workshop on Active Tectonics, Earthquake Geology, Archaeology and Engineering, Corinth, Greece*.
- Hipólito, A., Madeira, J., Gaspar, J.L., Carmo, R. (2010). Neotectónica da ilha Graciosa - uma contribuição para o enquadramento geodinâmico da junção tripla dos Açores. *Revista Electrónica de Ciências da Terra Geosciences On-line Journal*. VIII Congresso Nacional de Geologia. Volume 11 - nº 3 | 2010. ISSN 1645-0388.
- Krause, D. G., & Watkins, R. B. (1970). *North Atlantic crustal genesis in the vicinity of the Azores*. *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 19, 261-263.
- Larrea, P. (2014). Magmatic Evolution of Graciosa and Corvo Oceanic Islands, Azores Archipelago (Ph.D. thesis), Universidad de Zaragoza (209 pp.).
- Larrea, P., França, Z., Widom, E. and Lago, M. (2018). *Petrology of the Azores Islands*. DOI: 10.1007/978-3-642-32226-6_10.
- Larrea, P., Galé, C., Ubide, T., Widom, E., Lago, M., França, Z. (2014a). *Magmatic evolution of Graciosa (Azores, Portugal)*. *J. Petrol.* 55, 2125-2154.
- Larrea, P., Wijbrans, P.R., Galé, C., Ubide, T., Lago, M., França, Z., Widom, E. (2014). *40Ar/39Ar constraints on the temporal evolution of Graciosa Island, Azores (Portugal)*. *Bull. Volcanol.* 76, 796. <http://dx.doi.org/10.1007/s00445-014-0796-8>.
- Lourenço, N., Miranda, J. M., Luís, J. F., Ribeiro, A., Mendes-Victor, L., Madeira, J., Needham, H. (1998). *Morphotectonic analysis of the Azores Volcanic Plateau from a new bathymetric compilation of the area*. *Marine Geophys. Res.*, 20, 141-156.
- Needham, H., Francheteau, J. (1974). Some characteristics of the rift valley in the Atlantic Ocean near 36° 48' north. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 22, 29-43.
- Nunes J. C. (2002). Novos Conceitos em Vulcanologia: Erupções, Produtos e Paisagens Vulcânicas. *Associação Portuguesa de Geólogos. Geonovas*, n.º 16, pp 5-22.

- Pacheco, J.M., Ferreira, T., Queiroz, G., Wallenstein, N., Coutinho, R., Cruz, J.V., Pimentel, A., Silva, R., Gaspar, J.L., Goulart, C. (2013). Notas sobre a geologia do arquipélago dos Açores. In: Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P., Kullberg, J.C. (Eds.), *Geologia de Portugal*. Escolar Editora, Lisboa, pp. 595-690.
- Pelton W.L., King, K.M., and Tanner, C.B. (1960) *An Evaluation of the Thornthwaite and Mean Temperature Methods for Determining Potential Evapotranspiration*.
- PGRH-AÇORES. (2012). Plano de Gestão da Região Hidrográfica dos Açores. Relatório Técnico. Versão para consulta pública. Secretaria Regional do Ambiente - Direcção Regional do Ordenamento do Território & Instituto Nacional da Água. Ponta Delgada.
- Prada, S. (2000). *Geologia e Recursos Hídricos Subterrâneos da Ilha da Madeira*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Geologia, Universidade da Madeira, Funchal, 351 pp.
- Quartau, R., Hipólito, A. Mitchell, N.C., Gaspar, J.L., Brandão, F. (2015). Comment on "Construction and destruction of a volcanic Island developed inside an oceanic rift: Graciosa Island, Terceira Rift, Azores" by Sibrant *et al.* (2014) and proposal of a new model for Graciosa's geological evolution. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 303 (2015) 146-156. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.07.007>.
- REOT-A, 2013: Relatório do Estado do Ordenamento do Território da Região Autónoma dos Açores 2003 <http://www.azores.gov.pt /Gra/srrn-drotrh/conteudos/projectos/2009/Abril/REOTA+2003.htm?lang=pt&area=ct>.
- Santamarta, J. C, Lario-Bascones, R., J., Rodríguez-Martín, J., Hernández-Gutiérrez, L. E., Poncela, R. (2014). *Introduction to Hydrology of Volcanic Islands. 2014 International Conference on Environment Systems Science and Engineering*. Elsevier, IERI Procedia 9 (2014) 135 - 140. doi: 10.1016/j.ieri.2014.09.053.
- Searle, R. (1980). Tectonics pattern of the Azores spreading centre and triple junction. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 51, 415-434.
- Serralheiro, A. (1990). Comportamento das Rochas Vulcânicas à circulação das águas - GEOLIS, vol IV, fascículo 1e 2, p, 135-140.
- Sibrant, A.L.R., Marques, F.O., Hildenbrand, A. (2014). *Construction and destruction of a volcanic island developed inside an oceanic rift: Graciosa Island, Terceira Rift, Azores*. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 284, 32-45.
- Sibrant, L.R. (2014). *Évolution des îles volcaniques de Graciosa, S. Miguel et Santa Maria: implications pour la limite de plaque Nubie/Eurasie dans les Açores*. Thèse De Doctorat, Université Paris-Sud. 23 pp.
- Sommer, C. A., Lima, E. F., Rossetti, L. M. M., Waichel, B. L., Machado, A., Lopes, F. C., Saldanha, D. L., Barata, M. T. A., Barreto, C. J. (2014). Caracterização geoquímica das rochas vulcânicas da Ilha da Graciosa, Açores, Portugal: considerações preliminares.

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

Comunicações geológicas. 101, Especial I, 217-220, ISSN: 0873-948X; e-ISSN: 1647-581X.

SREA - Serviço Regional de Estatística dos Açores. (2017). Anuário Estatístico da Região Autónoma dos Açores. Região Autónoma dos Açores / ed. Serviço Regional de Estatística dos Açores. 436 p.

Werner, A. D., Bakker, M. Post, V. E. A. Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C. T., Barry, D.A. (2013). *Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. Advances in Water Resources* 51 (2013) 3-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.004>.

Anexo I

Características gerais dos pontos de água reconhecidos e parâmetros físico-químicos da água na ilha Graciosa, Açores.

(Medições *in situ* em dezembro de 2018)

Ponto de água subterrânea: Poço

Tabela I. 1: Enquadramento Geral e Características da água dos poços inventariados.

| Ponto de água | Longitude | Latitude | Cota na superfície | Profundidade | Nível freático | Temperatura | CE | Geologia (rocha e estrutura) |
|---------------|---------------|---------------|--------------------|--------------|----------------|-------------|---------|------------------------------|
| Ref. | xx°xx'xx'' | xx°xx'xx'' | (m) | (m) | (m) | (°C) | (μS/cm) | |
| P1 | 39°3'43,83"N | 28°1'44,50"W | 57,0 | 7,20 | 50,0 | 19,8 | 390,0 | Sem afloramentos |
| P2 | 39°3'49,66"N | 28°1'12,80"W | 66,0 | 10,1 | 58,0 | 18,4 | 600,0 | Sem afloramentos |
| P3 | 39° 3'52,69"N | 28° 1'11,15"W | 64,0 | 8,23 | 57,0 | 18,1 | 445,0 | Sem afloramentos |
| P4 | 39° 4'14,76"N | 28° 1'2,01"W | 68,0 | - | - | - | - | Sem afloramentos |
| P5 | 39° 4'11,58"N | 28° 0'59,58"W | 71,0 | - | - | - | - | Sem afloramentos |
| P6 | 39° 3'38,29"N | 27°58'40,79"W | 8,0 | | 0 | - | - | Sem afloramentos |

Tabela I. 2: Características do ponto de água e da captação dos poços inventariados.

| Ponto de água | Ocupação do solo | Características Topográficas | Meio acesso | Perímetro proteção | Processo e técnica de extração | Uso de água | Material de construção | Diâmetro | Altura do muro | Proteção cobertura |
|---------------|------------------|------------------------------|-------------|--------------------|--------------------------------|-------------|------------------------|----------|----------------|--------------------|
| Ref. | | | | | | | | (m) | (cm) | |
| P1 | Agrícola | Aplanado | Caminho | Muro | Manual | Sem uso | Rocha | 1,11 | 76,5 | Tampa de madeira |
| P2 | Urbano | Aplanado | Estrada | Muro | Manual | Sem uso | Rocha | 1,69 | 79,5 | Tampa de madeira |
| P3 | Urbano | Aplanado | Estrada | Muro | Manual | Sem uso | Rocha | 1,21 | 73,5 | Tampa de madeira |
| P4 | Agrícola | Aplanado | Estrada | Sem | Sem | Sem uso | Rocha | 1,82 | 35,0 | Abandonado |
| P5 | Agrícola | Aplanado | Caminho | Sem | Sem | Sem uso | Destruído | - | - | Abandonado |
| P6 | agrícola | aplanado | caminho | sem | Manual | Sem uso | rocha | 1,69m | | Sem proteção |

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

Ponto de água subterrânea: Furo

Tabela I. 3: Enquadramento Geral e Características da água dos furos inventariados.

| Ponto de água | Longitude | Latitude | Cota na superfície | Profundidade | Nível freático | Temperatura | CE |
|------------------|---------------|---------------|--------------------|--------------|----------------|-------------|---------|
| Ref ^a | xx°xx'xx'' | xx°xx'xx'' | (m) | (m) | (m) | (°C) | (μS/cm) |
| F1 | 39°0'46,26"N | 27°57'36,20"W | 24,0 | - | - | 36,0 | 16240,0 |
| F2 | 39°0'47,67"N | 27°57'36,39"W | 27,0 | - | - | - | - |
| F3 | 39°0'47,12"N | 27°57'34,67"W | 37,0 | - | - | - | - |
| F4 | 39° 2'21,25"N | 27°59'26,87"W | 111,8 | 121,2 | 1,2 | 20,1 | 3320,0 |
| F5 | 39° 2'27,98"N | 27°59'18,06"W | 107,0 | 109,9 | 0,8 | - | - |
| F6 | 39° 2'36,79"N | 27°59'10,42"W | 965,5 | 99,0 | 2,3 | 16,3 | 2320,0 |
| F7 | 39° 3'6,15"N | 28° 0'3,77"W | 128,0 | 128,5 | - | - | - |
| F8 | 39° 3'56,29"N | 27°59'29,45"W | 218,0 | - | - | - | - |
| F9 | 39° 4'13,64"N | 27°59'40,77"W | 150,0 | 158,0 | -0,5 | 19,2 | 1982,0 |
| F10 | 39° 4'15,62"N | 28° 0'9,33"W | 128,0 | 135,0 | 1,9 | - | - |
| F11 | 39° 4'15,20"N | 28° 0'49,23"W | 74,0 | 80,0 | 0,7 | 20,3 | 1844,0 |
| F12 | 39° 4'6,83"N | 28° 1'2,89"W | 69,2 | 79,0 | 1,7 | 24,0 | 2000,0 |
| F13 | 39° 4'8,98"N | 28° 1'6,28"W | 66,0 | 69,2 | 1,7 | - | - |
| F14 | 39° 4'27,06"N | 28° 1'30,51"W | 58,0 | 68,0 | - | - | - |
| F15 | 39° 3'41,69"N | 28° 1'47,83"W | 60,0 | - | - | 42,0 | - |
| F16 | 39° 3'33,85"N | 28° 0'59,52"W | 104,5 | 110,0 | -0,3 | 26,4 | 6060,0 |
| F17 | 39° 2'26,77"N | 28° 2'22,26"W | 213,0 | - | - | - | - |

Tabela I. 4: Características do ponto de água e da captação dos poços inventariados.

| Ponto de água Ref ^a | Ocupação do solo | Características Topográficas | Meio acesso | Perímetro proteção | Processo e técnica de extração | Uso de água | Prof. do ralo (m) | Bomba | Empresa e ano |
|-----------------------------------|------------------|------------------------------|-------------|--------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|---------------------|
| F1 | Agrícola | Sopé de cone | Trilho | Sem | Mecânico | Lúdico, medicinal | - | - | - |
| F2 | Agrícola | Sopé de cone | Trilho | Sem | Mecânico | Lúdico, medicinal | - | - | - |
| F3 | Agrícola | Sopé de cone | Trilho | Sem | Mecânico | Lúdico, medicinal | - | - | - |
| F4 | Urbano | Vale aplanado entre cones | Estrada | Muro e casa | Mecânica | Múltiplos | 112,7 | Grundfos SP45-21, motor 30Kw | J. Keller, 1969 |
| F5 | Agrícola | Vale aplanado entre cones | Caminho | Muro e casa | Mecânica | Múltiplos | 107,7 | Grundfos SP 27-24, 22 Kw | J. Keller, 1963 |
| F6 | Urbano | Vale aplanado entre cones | Estrada | Muro e casa | Mecânica | Múltiplos | 94,8 | Grundfos SP 45 -26, 30Kw | A. Cavaco, 1981 |
| F7 | Agrícola | <i>Graben</i> | Estrada | Sem | - | - | - | - | - |
| F8 | Agrícola | Vertente da Serra | Estrada | Sem | Sem | Sem | - | Grundfos, motor franklin de 56 Kw | SO GEO, 2011 |
| F9 | Agrícola | Vertente da Serra | Caminho | Casa | Mecânica | Múltiplos | 145,0 a 157,0 | Grundfos, motor Franklin de 56 Kw | SO GEO, 2010 |
| F10 | Agrícola | Vertente da Serra | Caminho | Sem | - | - | - | - | - |
| F11 | Urbano | Aplanado | Caminho | Muro e casa | Mecânica | Múltiplos | 67,9 a 79,5 | Grundfos SP46-42 | Intertec, Lda, 1993 |
| F12 | Urbano | Aplanado | Caminho | Muro casa | Mecânica | Múltiplos | 65,0 a 76,3 | Grundfos SP46-12 | A. Cavaco 1981 |
| F13 | Agrícola | Aplanado | Caminho | Muro e casa | Mecânica | Múltiplos | 64,8 a 67,8 | Grundfos SP 46-12 | J. Keller, 1982 |
| F14 | Agrícola | Sopé de cone | Estrada | Muro e casa | Sem | - | 53,6 a 58,6 | - | J. Keller, 1969 |
| F15 | Agrícola | Aplanado | Caminho | Sem | Sem | Monitorização | 57,0 | - | A. Cavaco, 1980 |
| F16 | Agrícola | <i>Graben</i> | Caminho | Casa | Mecânica | Múltiplos | 98,4 a 110,0 | Bomba SP46- motor 18,5 Kw | Intertec, Lda. 1993 |
| F17 | Agrícola | Vertente da Serra | - | - | - | Monitorização | - | - | - |

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

Ponto de água subterrânea: Nascentes

Tabela I. 5: Enquadramento Geral e Características da água das nascentes inventariadas.

| Ponto de água | Longitude | Latitude | Cota na superfície | Temperatura | CE | Geologia (rocha e estrutura) |
|------------------|---------------|---------------|--------------------|-------------|---------|------------------------------|
| Ref ^a | xx°xx'xx'' | xx°xx'xx'' | (m) | (°C) | (μS/cm) | |
| N1 | 39° 0'45.32"N | 27°57'32.38"W | 0 | - | - | - |
| N2 | 39° 1'0.94"N | 27°57'6.26"W | 0 | - | - | - |
| N3 | 39° 1'47.57"N | 27°57'11.35"W | 36 | 18,2 | 602,0 | Piroclastos - <i>lapilli</i> |
| N4 | 39° 2'11.56"N | 27°57'57.75"W | 116 | - | - | - |
| N5 | 39° 1'41.11"N | 27°59'10.95"W | 142 | - | - | Tubeo lávico |
| N6 | 39° 2'4.52"N | 28° 0'14.16"W | 235 | 17,3 | 449,0 | Piroclastos |
| N7 | 39° 2'6.29"N | 28° 0'25.80"W | 250 | 15,3 | 444,0 | Piroclastos |
| N8 | 39° 2'27.20"N | 28° 1'40.69"W | 286 | - | - | Piroclastos |
| N9 | 39° 2'25.82"N | 28° 1'40.83"W | 292 | 15,3 | 284,0 | Piroclastos |
| N10 | 39° 2'26.90"N | 28° 1'46.74"W | 295 | - | - | Piroclastos |
| N11 | 39° 3'16.90"N | 28° 0'50.11"W | 140 | - | - | - |
| N12 | 39° 3'33.44"N | 28° 0'16.43"W | 309 | - | - | Solo |
| N13 | 39° 3'35.21"N | 28° 0'22.07"W | 299 | - | - | Solo |
| N14 | 39° 3'37.82"N | 28° 0'24.85"W | 274 | - | - | Solo |
| N15 | 39° 3'38.65"N | 28° 0'25.55"W | 266 | - | - | Solo |
| N16 | 39° 3'38.41"N | 28° 0'26.64"W | 269 | - | - | Solo |
| N17 | 39° 3'36.46"N | 28° 0'29.95"W | 288 | - | - | Solo |
| N18 | 39° 3'37.23"N | 28° 0'31.34"W | 282 | - | - | Solo |
| N19 | 39° 3'42.29"N | 28° 0'23.85"W | 234 | - | - | Solo |
| N20 | 39° 3'43.52"N | 28° 0'23.54"W | 226 | - | - | Solo |
| N21 | 39° 3'46.16"N | 28° 0'24.04"W | 207 | - | - | Solo |
| N22 | 39° 4'52.12"N | 28° 3'21.58"W | 0 | - | - | - |
| N23 | 39° 1'50.16"N | 27°58'57.25"W | 189 | - | - | Tubeo lávico |

Tabela I. 6: Características do ponto de água e da captação dos poços inventariados.

| Ponto de água | Ocupação do solo | Características Topográficas | Meio acesso | Proteção | Processo e técnica de extração | Uso de água | Exsurgência | Estrutura captação |
|------------------|------------------|------------------------------|-------------|----------|--------------------------------|-------------|-------------|--------------------|
| Ref ^a | | | | | | | | |
| N1 | Área costeira | Linha de Costa | - | - | - | - | - | - |
| N2 | Área costeira | Linha de Costa | - | - | - | - | - | - |
| N3 | Florestado | Arriba costeira | Trilho | Sem | Sem | Doméstico | Difusa | Pias |
| N4 | Pastagem | Vertente de Cone vulcânico | - | - | - | - | - | - |
| N5 | Pastagem | Tubo lávico | Corta-mato | - | - | - | Concentrada | Cisterna- |
| N6 | Pastagem | Base de cone | Corta-mato | Casa | Grav-mecânica | Múltiplos | Difusa | Cisterna |
| N7 | Pastagem | Cone vulcânico | Caminho | Casa | Grav-mecânica | Múltiplos | Difusa | Cisterna |
| N8 | Florestado | Cone vulcânico | Caminho | Casa | - | - | | Cisterna |
| N9 | Pastagem | Cone vulcânico | Caminho | Casa | Grav-mecânica | Múltiplos | Difusa | - |
| N10 | Pastagem | Cone vulcânico | Caminho | Caixa | Grav-mecânica | Múltiplos | Concentrada | - |
| N11 | Pastagem | Aplana | Estrada | Muro | Mecânica | Múltiplos | | Tanque |
| N12 | Pastagem | Encosta da Serra | Caminho | Casa | Gravidade | Múltiplos | Difusa | Telhas |
| N13 | Pastagem | Encosta da Serra | Caminho | Casa | Gravidade | Múltiplos | Difusa | Telhas |
| N14 | Pastagem | Encosta da Serra | Caminho | Casa | Gravidade | Múltiplos | Difusa | Telhas |
| N15 | Pastagem | Encosta da Serra | Caminho | Casa | Gravidade | Múltiplos | Difusa | Telhas |
| N16 | Pastagem | Encosta da Serra | Caminho | Casa | Gravidade | Múltiplos | Difusa | Telhas |
| N17 | Pastagem | Encosta da Serra | Caminho | Casa | Gravidade | Múltiplos | Difusa | Telhas |
| N18 | Pastagem | Encosta da Serra | Caminho | Casa | Gravidade | Múltiplos | Difusa | Telhas |
| N19 | Pastagem | Encosta da Serra | Caminho | Casa | Gravidade | Múltiplos | Difusa | Telhas |
| N20 | Pastagem | Encosta da Serra | Caminho | Casa | Gravidade | Múltiplos | Difusa | Telhas |
| N21 | Pastagem | Encosta da Serra | Caminho | Casa | Gravidade | Múltiplos | Difusa | Telhas |
| N22 | Área costeira | Linha de Costa | - | - | - | - | - | - |
| N23 | Pastagem | Tubo lávico | Corta-mato | - | - | - | Concentrada | - |

Anexo II

Dados bibliográficos dos parâmetros físico-químicos, químicos (concentração de cloretos) e microbiológicos.

Relatórios de furo; Análises encomendadas pela CM de Sta. Cruz da Graciosa; Relatórios da rede de monitorização da DROTRH.

Tabela II. 1: Parâmetros físico-químicos e químicos dos furos na ilha Graciosa. (T - Temperatura; pH; CE -Condutividade Elétrica) (Fonte: CM Sta. Cruz da Graciosa).

| Ref. | Data | T(°C) | pH | CE (µS/cm) | Cloretos (mg/L) |
|------|--------|-------|-----|------------|-----------------|
| F4 | fev/16 | 18,0 | 6,6 | 2000,0 | 650,0 |
| | ago/16 | 23,0 | 7,3 | 1824,0 | 360,0 |
| | nov/16 | 18,0 | 7,3 | 1783,0, | 550,0 |
| | jun/17 | 18,0 | 7,1 | 2300,0 | 160,0 |
| | set/17 | 20,0 | 7,0 | 1700,0 | 690,0 |
| | fev/18 | 20,0 | 7,0 | 3000,0 | 880,0 |
| | jun/18 | 21,0 | 7,2 | 2800,0 | 733,0 |
| | out/18 | 21,0 | 7,0 | 3000,0 | 883,0 |
| F6 | mai/16 | 18,0 | 7,3 | 1555,0 | 320,0 |
| | ago/16 | 23,0 | 7,2 | 1472,0 | 400,0 |
| | nov/16 | 18,0 | 7,0 | 1407,0 | 370,0 |
| | fev/18 | 19,0 | 7,2 | 1700,0 | 410,0 |
| | out/18 | 21,0 | 7,2 | 2400,0 | 622,0 |
| F9 | fev/16 | 17,0 | 6,9 | 1300,0 | 370,0 |
| | mai/16 | 17,0 | 7,2 | 1391,0 | 370,0 |
| | ago/16 | 23,0 | 7,4 | 504,0 | 86,0 |
| | nov/16 | 18,0 | 6,7 | 1405,0 | 350,0 |
| | jun/17 | 18,0 | 6,7 | 1700,0 | 374,0 |
| | set/17 | 20,0 | 7,0 | 1400,0 | 460,0 |
| | dez/17 | 20,0 | 6,8 | 1300,0 | 420,0 |
| | fev/18 | 19,0 | 6,7 | 1800,0 | 400,0 |
| | jun/18 | 22,0 | 6,7 | 2000,0 | 446,0 |
| | out/18 | 21,0 | 6,7 | 2300,0 | 615,0 |
| F11 | fev/16 | 17,0 | 7,0 | 9600,0 | 320,0 |
| | mai/16 | ,0 | , | , | 370,0 |
| | ago/16 | 23,0 | 7,9 | 1031,0 | 270,0 |
| | nov/16 | 18,0 | 7,8 | 935,0 | 290,0 |
| | jun/17 | 18,0 | 7,4 | 1200,0 | 272,0 |
| | set/17 | 20,0 | 7,7 | 1100,0 | 263,0 |
| | dez/17 | 20,0 | 7,8 | 980,0 | 362,0 |
| | fev/18 | 19,0 | 7,6 | 1200,0 | 283,0 |
| | jun/18 | 21,0 | 7,7 | 1200,0 | 295,0 |
| F16 | fev/16 | 17,0 | 6,8 | 3800,0 | 1300,0 |
| | mai/16 | 18,0 | 7,3 | 4230,0 | 1500,0 |
| | ago/16 | 23,0 | 7,7 | 4820,0 | 1500,0 |
| | nov/16 | 18,0 | 7,9 | 3400,0 | 750,0 |
| | jun/17 | 18,0 | 7,4 | 4900,0 | 1600,0 |
| | fev/18 | 19,0 | 7,5 | 4800,0 | 1600,0 |
| | jun/18 | 21,0 | 7,6 | 5700,0 | 1670,0 |

HIDROGEOLOGIA DE ILHAS VULCÂNICAS

Tabela II. 2: Parâmetros físico-químicos, químicos e microbiológicos das nascentes da ilha Graciosa. (T - Temperatura; pH; CE - Condutividade Elétrica; Cl- - Cloretos; C.F. - Coliformes fecais; C.T. - Coliformes totais; E.F. – Estreptococos fecais) (Fonte: Portal do Governo Regional dos Açores).

| Ref. | Data | T | pH | CE | Cl- | C.F. | C.T. | E.F. |
|----------------|----------|------|-------|---------|--------|-------------|------|------|
| Unidades | | (°C) | | (µS/cm) | (mg/L) | (ufc/100ml) | | |
| N6-N7 | set/2006 | 18,0 | 7,7 | 388,0 | 66,0 | <10 | <10 | <10 |
| | jun/2009 | 19,0 | 7,4 | 410,0 | 68,0 | <10 | <10 | <10 |
| | jul/2010 | 18,0 | 7,6 | 409,0 | 54,0 | <10 | <10 | <10 |
| | dez/2010 | 18,8 | 7,8 | 420,0 | - | 820 | 540 | - |
| | mar/2011 | 16,4 | 7,4 | 389,0 | 54,0 | 370 | 220 | <1 |
| | jul/2011 | 21,0 | 7,3 | 413,0 | - | <10 | <10 | - |
| | nov/2015 | 18,0 | 7,5 | 420,0 | - | <1 | 86 | - |
| | abr/2016 | 17,0 | 7,1 | 410,0 | 56,0 | <1 | 2 | <1 |
| | out/2016 | 18,0 | 7,5 | 440,0 | - | <1 | 6 | - |
| | abr/2017 | 17,0 | 7,6 | 440,0 | 55,0 | <1 | 13 | <1 |
| | out/2017 | 18,0 | 7,7 | 470,0 | - | 11 | 52 | - |
| abr/2018 | 19,0 | 7,4 | 410,0 | 38,0 | 2 | 47 | <1 | |
| N9 | set/2006 | 15,5 | 8,1 | 310,0 | 51,0 | <10 | <10 | <10 |
| | jun/2009 | 19,0 | 7,4 | 410,0 | 68,0 | <10 | <10 | <10 |
| | jul/2010 | 15,0 | 8,2 | 340,0 | 48,0 | 50 | <10 | <10 |
| | dez/2010 | 16,0 | 8,0 | 290,0 | - | <10 | <10 | - |
| | mar/2011 | 14,6 | 7,9 | 281,0 | 44,0 | <10 | <10 | <10 |
| | jul/2011 | 19,0 | 8,2 | 300,0 | - | <10 | 560 | - |
| | nov/2015 | 17,0 | 8,0 | 280,0 | - | <1 | 820 | - |
| | abr/2016 | 16,0 | 7,6 | 280,0 | 44,0 | <1 | <1 | <1 |
| | out/2016 | 18,0 | 8,3 | 280,0 | - | 70 | 330 | - |
| | abr/2017 | 16,0 | 8,3 | 310,0 | 46,0 | <1 | 190 | <1 |
| | out/2017 | 17,0 | 8,2 | 440,0 | - | <1 | 79 | - |
| abr/2018 | 18,0 | 8,9 | 310,0 | 89,0 | <1 | 25 | 1 | |
| N12-N21 | set/2006 | 13,0 | 7,8 | 979,0 | 277,0 | 510 | 100 | 60 |
| | jun/2009 | 20,0 | 9,0 | 245,0 | 51,0 | 100 | 120 | 10 |
| | jul/2010 | 18,0 | 7,8 | 252,0 | 47,0 | 100 | <10 | 30 |
| | dez/2010 | 16,8 | 7,5 | 252,0 | - | <10 | <10 | - |
| | mar/2011 | 15,4 | 7,6 | 228,0 | 43,0 | <10 | <10 | <10 |
| | jul/2011 | 19,5 | 8,0 | 255,0 | - | 150 | 250 | - |
| | nov/2015 | 18,0 | 7,4 | 220,0 | - | 28 | 1700 | - |
| | abr/2017 | 17,0 | 7,8 | 250,0 | 41,0 | 3 | 770 | 1 |
| | out/2017 | 18,0 | 7,8 | 970,0 | - | <1 | 7 | - |
| abr/2018 | 18,0 | 7,6 | 240,0 | 34,0 | 1 | 490 | <1 | |

Tabela II. 3: Parâmetros físico-químicos, químicos e microbiológicos das nascentes da ilha Graciosa. (T - Temperatura; pH; CE - Condutividade Elétrica; Cl- - Cloretos; C.F. - Coliformes fecais; C.T. - Coliformes totais; E.F. – Estreptococos fecais) (Fonte: Portal do Governo Regional dos Açores).

| Ref. | Data | T | pH | CE | Cl- | C.F. | C.T. | E.F. |
|----------|----------|------|------|---------|--------|-------------|------|------|
| Unidades | | (°C) | | (µS/cm) | (mg/L) | (ufc/100ml) | | |
| F4 | set/2006 | 7,20 | 20,0 | 2800,0 | 869,0 | <10 | <10 | <10 |
| | jun/2009 | 7,0 | 20,0 | 2700,0 | 793,0 | <10 | <10 | <10 |
| | dez/2010 | 6,9 | 23,2 | 2880,0 | 765,0 | <10 | <10 | - |
| | jul/2011 | 7,2 | 20,5 | 2000,0 | 552,0 | <10 | <10 | <10 |
| | fev/2012 | 6,9 | 16,5 | 2100,0 | 595,0 | <10 | <10 | <10 |
| | abr/2016 | 6,5 | 17,0 | 1200,0 | 253,0 | <1 | 200 | 1 |
| | out/2016 | 7,1 | 19,0 | 2200,0 | 430,0 | <1 | <1 | - |
| | abr/2018 | 7,1 | 18,0 | 2800,0 | 744,0 | <1 | <1 | <1 |
| F5 | nov/2015 | 7,1 | 18,0 | 1300,0 | 368,0 | <1 | 210 | - |
| | out/2016 | 7,0 | 19,0 | 1200,0 | 188,0 | <1 | <1 | - |
| | abr/2017 | 6,9 | 18,0 | 1400,0 | 340,0 | <1 | 3 | <1 |
| | out/2017 | 7,0 | 18,0 | 1400,0 | 274,0 | <1 | 8 | - |
| | abr/2018 | 7,1 | 18,0 | 2800,0 | 728,0 | <1 | <1 | <1 |
| F11 | jun/2009 | 7,7 | 23,5 | 1130,0 | 317,0 | <10 | <10 | <10 |
| | dez/2010 | 7,7 | 23,4 | 1180,0 | 318,0 | <10 | <10 | - |
| | nov/2015 | 7,2 | 19,0 | 1100,0 | 283,0 | <1 | <1 | - |
| | abr/2016 | 7,2 | 17,0 | 1100, | 282,0 | <1 | <1 | <1 |
| | out/2016 | 7,6 | 19,0 | 1200,0 | 184,0 | <1 | <1 | - |
| | abr/2017 | 7,8 | 17,0 | 1200,0 | 285,0 | <1 | <1 | <1 |
| | out/2017 | 7,6 | 18,0 | 840,0 | 267,0 | <1 | 1 | - |
| | abr/2018 | 7,8 | 18,0 | 1200,0 | 293,0 | <1 | <1 | <1 |
| F12 | set/2006 | 7,5 | 24,0 | 2800,0 | 869,0 | <10 | <10 | <10 |
| | jun/2009 | 7,5 | 25,0 | 4000,0 | 1360,0 | <10 | <10 | <10 |
| | jul/2010 | 7,9 | 25,0 | 2560,0 | 719,0 | <10 | <10 | <10 |
| | dez/2010 | 7,6 | 23,4 | 1560,0 | 404,0 | <10 | <10 | - |
| | jul/2011 | 7,4 | 21,5 | 3640,0 | 1180,0 | 60 | 90 | <10 |
| | fev/2012 | 7,2 | 17,0 | 1390,0 | 398,0 | <10 | <10 | <10 |
| | abr/2016 | 7,3 | 17,0 | 1400,0 | 378,0 | <1 | <1 | <1 |
| | out/2016 | 7,7 | 19,0 | 2700,0 | 24,0 | <1 | 960 | - |
| | abr/2017 | 7,8 | 17,0 | 2000,0 | 520,0 | <1 | <1 | <1 |
| | out/2017 | 7,6 | 18,0 | 3000,0 | 948,0 | <1 | 1 | - |