

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Caraterização e avaliação dos recursos hidrogeológicos e geotérmicos de baixa entalpia em Angra do Heroísmo

Vasco Rafael Gomes de Almeida

Mestrado em Geologia
Especialização em Geologia Aplicada e Ambiental

Dissertação orientada por:
Maria Rosário Carvalho
João Carlos Nunes

Agradecimentos

Agradeço à Professora Maria do Rosário de Carvalho e ao Professor João Carlos Nunes pela orientação e apoio ao longo deste processo. O vosso acompanhamento foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também ao INOVA pelo financiamento que viabilizou este projeto, e em especial ao Guilherme Parreira e Henrique Sá pela disponibilidade em colaborar ao longo do projeto.

Um agradecimento à Sara Medeiros pela ajuda na cartografia em ambiente SIG. A sua disponibilidade e competência foram essenciais para a concretização desta tarefa.

Aos meus pais, Ana Paula e Rui, agradeço por todo o apoio, paciência e incentivo ao longo da minha jornada académica.

Aos meus amigos, Rui e Francisco, obrigado por estarem sempre presentes, especialmente nos momentos mais difíceis.

Por fim, quero deixar um agradecimento especial à minha namorada Catarina. Ela foi um pilar fundamental ao longo deste percurso, ajudando não só emocionalmente, mas também com conselhos, revisões e muita motivação. Sem o seu apoio, esta tese seria muito mais difícil de realizar.

Resumo

A energia geotérmica, uma fonte de energia renovável com baixas emissões de carbono, promissora em regiões onde existe um elevado gradiente geotérmico ou tectónica profunda, como é o caso de regiões vulcânicas ativas do globo, tais como o arquipélago dos Açores. Nas proximidades da cidade de Angra do Heroísmo, na ilha Terceira, ocorre um sistema geotérmico de baixa entalpia, ainda pouco conhecido e inexplorado, podendo constituir um valioso recurso como fonte de calor para diversos usos, entre os quais o aquecimento urbano (*district heating*).

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação teve como objetivo caracterizar o sistema geotérmico e avaliar o seu potencial energético. Engloba ainda a caracterização hidrogeológica dos aquíferos termais, a estimativa de temperaturas, a quantificação dos recursos visando a proposta de um modelo conceptual dos sistemas envolvidos.

O reservatório geotérmico de Angra do Heroísmo está associado às formações do Vulcão de Guilherme Moniz, Santa Bárbara e à Zona Basáltica Fissural (ZBF) da Terceira, influenciado por falhas de direção NNW-SSE e WNW-ESE. A região apresenta aquíferos suspensos e de base, com águas de diferentes características hidroquímicas e tempos de residência. O escoamento subterrâneo ocorre de norte para sul, com recarga estimada em 34,9 hm³/ano.

A disponibilidade de calor no reservatório termal diminui progressivamente de norte para sul e do centro para a periferia. O potencial geotérmico do sistema de baixa entalpia, calculado pelo método *Heat-In-Place* é de aproximadamente 35 MW. A estimativa do potencial energético, utilizando uma abordagem probabilística combinada com simulações de Monte Carlo assumindo distribuição normal varia entre 28,04 MW e 30,86 MW. Estudos adicionais são necessários para melhor quantificação do recurso.

Palavras-chave: Cartografia vulcanológica; Hidrogeologia; Geotermia de baixa entalpia; Avaliação de recursos; Angra do Heroísmo.

Abstract

Geothermal energy is a renewable source with low carbon emissions, particularly promising in regions with a high geothermal gradient or significant tectonic activity, such as active volcanic areas around the globe, including the Azores archipelago. Near the city of Angra do Heroísmo, on Terceira Island, there is a low-enthalpy geothermal system that remains largely unexplored and poorly understood. This system could be a valuable heat source for various applications, including district heating.

The work carried out as part of this dissertation aimed to characterize the geothermal system and assess its energy potential. It also includes the hydrogeological characterization of thermal aquifers, temperature estimation, and resource quantification, to propose a conceptual model of the involved systems.

The geothermal reservoir of Angra do Heroísmo is associated with the formations of the Guilherme Moniz Volcano, Santa Bárbara, and the Fissural Basaltic Zone (ZBF) of Terceira. It is influenced by fault structures oriented NNW-SSE and WNW-ESE. The region features perched and basal aquifers, with waters exhibiting different hydrochemical characteristics and residence times. Groundwater flow occurs from north to south, with an estimated recharge of 34.9 hm³/year.

The availability of heat in the thermal reservoir progressively decreases from north to south and from the center toward the periphery. The geothermal potential of the low-enthalpy system, calculated using the Heat-In-Place method, is approximately 35 MW. An energy potential estimate, obtained through a probabilistic approach combined with Monte Carlo simulations assuming a normal distribution, ranges between 28.04 MW and 30.86 MW. Further studies are required for a more precise quantification of the resource.

Keywords: Volcanological mapping; Hydrogeology; Low enthalpy geothermal energy; Resource assessment; Angra do Heroísmo.

Índice

1.	Introdução.....	12
2.	Objetivos	13
3.	Estado de Arte sobre Geotermia	14
3.1	Definição de Geotermia	14
3.2	Reservatórios geotérmicos e tipos de geotermia.....	15
3.3	Resenha histórica da geotermia.....	20
3.4	Geotermia no Mundo	21
3.5	Geotermia nos Açores.....	23
4.	Caracterização da área de estudo: a ilha Terceira.....	26
4.1	Enquadramento geográfico	26
4.2	Enquadramento geoestrutural	26
4.3	Geomorfologia	27
4.4	Vulcanologia	28
4.5	Tectónica e Sismicidade	30
4.6	Solos e vegetação.....	30
4.7	Hidrologia e Hidrogeologia	31
4.7.1	Clima	31
4.7.2	Rede hidrográfica	32
4.7.3	Hidrogeologia	33
4.8	Recursos Geotérmicos	35
5.	Metodologias.....	38
5.1	Metodologia geral do trabalho	38
5.2	Cartografia vulcanológica.....	38
5.3	Hidrogeologia	39
5.3.1	Estimativa da Infiltração de Aquíferos	39
5.3.2	Amostragem de Águas Subterrâneas e Métodos Analíticos.....	40
5.3.3	Tratamento de dados químicos e isotópicos	42
5.3.4	Estimativa da Temperatura da Água no Reservatório	44
5.4	Estimativa do potencial energético	47
6.	Cartografia Vulcanológica da Área de Estudo	49
7.	Caraterização Hidrogeológica e Termal da Área de Estudo.....	51
7.1	Infiltração e Recarga de Aquíferos	51
7.2	Caracterização Hidrodinâmica.....	52
7.3	Caracterização Hidrogeoquímica.....	54
7.4	Composição em Isótopos Estáveis de Oxigénio e Hidrogénio	57
7.5	Geotermometria das águas termais	60

8. Modelo Conceptual	63
9. Estimativa do potencial geotérmico	67
10. Conclusões	70
Referências	71
Anexo A.....	76

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Esboço Vulcano-estratigráfico da Ilha Terceira (In: Nunes, 2004). Retângulo inserido indica a área de estudo e circunferência a localização do campo fumarólico das Furnas do Enxofre.	12
Figura 3.1 - Esquema da geodinâmica interna da Terra e repartição dos fluxos de calor de acordo com a estabilidade geológica da zona (In: DGEG, 2017).	15
Figura 3.2 - Modelo Conceptual de Reservatório Geotérmico (adaptado de Lidsen, 2023).	16
Figura 3.3 - Sistema geotérmico convencional (adaptado de Flóvez, 2008).	17
Figura 3.4 - Sistema geotérmico não convencional (adaptado de Flóvez, 2008).	17
Figura 3.5 - Diagrama de Lindal com o aproveitamento dos recursos geotérmicos em cascata (In: Carvalho & Carvalho, 2004).	18
Figura 3.6 - Esquema de funcionamento de uma turbina para produção de energia elétrica a partir de vapor seco (In: DGEG, 2017).	18
Figura 3.7 - Esquema de funcionamento de uma turbina para produção de energia elétrica a partir de vapor húmido (In: DGEG, 2017).	18
Figura 3.8 - Esquema de funcionamento de uma turbina para produção de energia elétrica em ciclo binário (In: DGEG, 2017).	19
Figura 3.9 - Bomba de calor e seus principais componentes (In: DGEG, 2017).	19
Figura 3.10 - Representação esquemática de sistemas geotérmicos superficiais abertos (A), fechados verticais (B) e fechados horizontais (C), (In: DGEG, 2017).	20
Figura 3.11 - Distribuição atual das centrais geotérmicas no mundo (ThinkGeoEnergy, 2025).	21
Figura 3.12 - Energia elétrica produzida na ilha de São Miguel de janeiro a novembro de 2024 e contributo das energias renováveis, incluindo energia geotérmica (EDA, 2024a).	24
Figura 3.13 - Energia elétrica produzida na ilha Terceira de janeiro a novembro de 2024 e contributo das energias renováveis, incluindo energia geotérmica (EDA, 2024a).	24
Figura 4.1 - Enquadramento geográfico da área de estudo (adaptado de DROTRH, 2021a e IGC, 1971).	26
Figura 4.2 - Enquadramento geoestrutural do Arquipélago dos Açores e da ilha Terceira; Legenda: CMA - Crista Médio-Atlântica; RT - Rife da Terceira; ZFNA - Zona de Fratura Norte dos Açores; ZFEA - Zona de Fratura Este dos Açores; ZFOA - Zona de Fratura Oeste dos Açores; ZFBPA - Zona de Fratura Banco Princesa Alice; ZFBA - Zona de Fratura Banco Açores; FG - Falha Glória; ZFFP - Zona de Fratura Faial-Pico; TSJ - Transformante de São Jorge (In: Nunes, 1999).	27
Figura 4.3 - Esboço Vulcano-tectónico da Ilha Terceira (Nunes, 2000).	28
Figura 4.4 - Carta hidrográfica da ilha Terceira (adaptado de DROTRH, 2021b).	33
Figura 4.5 - Massas de água subterrâneas e pontos de água na ilha Terceira (DROTRH, 2021b).	34
Figura 4.6 - Localização da concessão geotérmica (retângulo inserido) do Pico Alto, Ilha Terceira (DGEG, 2017).	36
Figura 4.7 - Modelo conceptual do sistema geotérmico do Pico Alto (Nunes et al., 2016).	36
Figura 4.8 - Localização de captações por furo na área envolvente à cidade de Angra do Heroísmo e temperatura das águas captadas; Legenda: FVB - Furo da Vinha Brava, FFR - Furo do Farrouco, FPS - Furo do Posto Santo, FTC - Furo da Terra Chã (Carvalho et al., 2022b).	37

Figura 5.1 - Localização de pontos de água utilizados neste estudo: a vermelho, locais onde foi efetuada amostragem no âmbito deste trabalho; a amarelo, locais com dados bibliográficos.....	41
Figura 5.2 - Representação da área modelada para o cálculo do potencial energético.....	48
Figura 6.1 - Carta vulcanoestratigráfica da área de estudo (adaptado de Nunes et al., 2024). Legenda: 1 - escarpas de falha; 2 - alinhamentos vulcanotectónicos; 3 - arco de cratera; 4 - arco de caldeira; 5 - domo traquítico s.l.; 6 - datação radiométrica, em milhares de anos; 7 - furo de captação; 8 - nascente; ig - ignimbrito das Lajes; SB - Vulcão de Santa Bárbara; GM - Vulcão Guilherme Moniz; PA - Vulcão do Pico Alto; FE - campo fumarólico das Furnas do Enxofre.....	50
Figura 7.1 - Mapa do Índice de Referência (IRef _{adp}) para a área em estudo.	51
Figura 7.2 - Mapa de infiltração na área em estudo.	52
Figura 7.3 - Localização dos furos sobre os complexos vulcânicos na zona de estudo.	54
Figura 7.4 - Projeção das amostras da área em estudo num Diagrama de Piper; Legenda: FT1 - Fonte da Telha 1, FT3 - Fonte da Telha 3, FT4 - Fonte da Telha 4, NA1 - Nasce Água 1, NA2 - Nasce Água 2, NA3 - Nasce Água 3, NG - Negrito, BR - Bravio, SIL1 - Silveira, SIL2 - Silveira, TC1 - Terra Chã, TC2 - Terra Chã, VB - Vinha Brava, FR - Farrouco, PS - Posto Santo, SM 1- São Mateus.	56
Figura 7.5 - Projeção da composição isotópicas das amostras num diagrama $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$, conjuntamente com a RAMG (Reta das Águas Meteoricas Globais), RMR (Reta Meteorica Regional dos Açores, proposta por Carvalho, 1999) e a RMR (Rodrigues, 2002) (Reta Meteorica Regional dos Açores proposta por Rodrigues (2002)); Legenda: FT1 - Fonte da Telha 1, FT2 - Fonte da Telha 1, NA1 - Nasce Água 1, NA2 - Nasce Água 1, TC1 - Terra Chã, TC2 - Terra Chã, TC3 - Terra Chã, TC4 - Terra Chã, VB1 - Vinha Brava; VB2 - Vinha Brava, FR - Farrouco, PS1 - Posto Santo, PS2 - Posto Santo, SM - São Mateus.	58
Figura 7.6 - Projeção do conteúdo em $\delta^{18}\text{O}$ e a cota (m) de emergência ou de captação da água; Legenda: FT1 - Fonte da Telha 1, FT2 - Fonte da Telha 1, NA1 - Nasce Água 1, NA2 - Nasce Água 1, TC1 - Terra Chã, TC2 - Terra Chã, TC3 - Terra Chã, TC4 - Terra Chã, VB1 - Vinha Brava; VB2 - Vinha Brava, FR - Farrouco, PS1 - Posto Santo, PS2 - Posto Santo, SM - São Mateus.	59
Figura 7.7 - Projeção das águas termais num Diagrama de Giggenbach; Legenda: BR - Bravio, SIL - Silveira, TC1 - Terra Chã, TC2 - Terra Chã, FR - Farrouco, PS - Posto Santo.	62
Figura 8.1 - Cartografia vulcanológica da área de estudo (Nunes et al., 2024), localização de furos de captação e nascentes e representação do traçado dos perfis geológicos A-B e C-D.	64
Figura 8.2 - Perfil geológico interpretativo A-B, com base na cartografia vulcanológica de superfície e em logs de sondagem de furos de captação. Adaptado de Nunes et al. (2024).	64
Figura 8.3 - Perfil geológico interpretativo C-D, com base na cartografia vulcanológica de superfície e em log de sondagem do furo de captação Posto Santo. Adaptado de Nunes et al. (2024).	65
Figura 8.4 - Mapa de temperatura da água subterrânea, por interpolação pelo método Topo to Raster.	66
Figura 9.1 - Mapa de temperatura da água no reservatório geotérmico, dividido em células de 500 x500 m.....	67
Figura 9.2 - Distribuição normal (PDF) do potencial geotérmico, Heat-In-Place (HIP,) do reservatório de Angra dos Heroísmo.	68
Figura 9.3 - Curva de probabilidade do potencial geotérmico, Heat-In-Place (HIP), do reservatório geotérmico, de Angra dos Heroísmo.	68
Figura 9.4 - Variação espacial do potencial energético, HIP (P10, P50, P90) e potencial energético recuperável, Hrec (P10, P50, P90), do sistema geotérmico de Angra do Heroísmo.	69

Figura A.1 - Carta de índices das classes de declive, obtidas em SIG através do modelo digital de terreno e do intervalo de declives da Tabela A.1, construída para o cálculo da infiltração na área em estudo.	76
Figura A.2 - Carta de índices das classes de litologia, obtidas em SIG através do modelo digital de terreno e do intervalo de litologias da Tabela A.2, construída para o cálculo da infiltração na área em estudo.	77
Figura A.3 - Mapa de Precipitação (adaptado de DROTRH, 2021b).....	77
Figura A.4 - Gráfico de Temperatura vs Índice de Saturação do furo de Terra Chã (TC1).....	78
Figura A.5 - Gráfico de Temperatura vs Índice de Saturação do furo de Terra Chã (TC2).....	79
Figura A.6 - Gráfico de Temperatura vs Índice de Saturação do furo do Farrouco (FR).	79
Figura A.7 - Gráfico de Temperatura vs Índice de Saturação do furo de Posto Santo (PS).	80

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Países com maior capacidade de geração de energia geotérmica no final de 2023 (adaptado de ThinkGeoEnergy, 2025).....	22
Tabela 3.2 - Capacidade instalada nos países com maiores usos diretos da energia geotérmica (excluindo bombas de calor), no final de 2019 (adaptado de ThinkGeoEnergy, 2025).	22
Tabela 5.1 - Características dos pontos de água utilizados neste estudo.	41
Tabela 5.2 - Equações dos geotermômetros de sílica.	44
Tabela 5.3 - Equações dos geotermômetros de Na/K.	45
Tabela 5.4 - Equações dos geotermômetros de Na-K-Ca.	46
Tabela 5.5 - Equações dos geotermômetros de K/Mg.	46
Tabela 5.6 - Equações dos geotermômetros de Na-Li.	47
Tabela 7.1 - Recarga dos sistemas aquíferos englobados na área de estudo.	52
Tabela 7.2 - Características dos furos de captação e parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos captados; Legenda: NHE - nível hidrostático; NHD - nível hidrodinâmico; Q - caudal; T - transmissividade; K - condutividade hidráulica.	53
Tabela 7.3 - Altitude das nascentes e caudal drenado.....	53
Tabela 7.4 - Parâmetros físico-químicos das águas de nascentes e furos.	55
Tabela 7.5 - Composição química das águas de nascente e furos.	56
Tabela 7.6 - Concentração em elementos menores nas águas estudadas.....	57
Tabela 7.7 - Razões isotópicas $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, excesso de deutério (d) nas águas e a respetiva cota de emergência ou de captação.	58
Tabela 7.8 - Temperaturas de reservatório obtidas com geotermômetros aquosos de Sílica.....	60
Tabela 7.9 - Temperaturas de reservatório obtidas com geotermômetros aquosos Na/K.	60
Tabela 7.10 - Temperaturas de reservatório obtidas com geotermômetros aquosos Na-K-Ca.....	61
Tabela 7.11 - Temperaturas de reservatório obtidas com geotermômetros aquosos K-Mg.	61
Tabela 7.12 - Cálculo de geotermômetros de Na-Li.....	61
Tabela 7.13 - Temperaturas de equilíbrio das águas em relação a várias fases minerais.	62
Tabela 9.1 - Propriedades e parâmetros da rocha e fluido utilizados para a estimativa do potencial geotérmico.....	67
Tabela 9.2 - Potencial energético do sistema geotérmico de Angra do Heroísmo, Heat-In-Place (HIP). Legenda: P90 - Probabilidade de 90%, P50 - Probabilidade de 50%, P10 - Probabilidade de 10 %, PJ - Petajoule.	69

Tabela A.1 - Distribuição de classes de declive e respetivo índice na área em estudo.....	76
Tabela A. 2 - Distribuição de classes de litologia e respetivo índice na área em estudo, adaptado de Aller et al. (1985).	76
Tabela A.3 - Dados relativos a recarga (DROTRH–INAG,2001).	77
Tabela A.4 - Dados relativos a recarga (DROTRH, 2015).	78
Tabela A.5 - Dados relativos a recarga (DROTRH, 2021).	78

1. Introdução

Nos dias de hoje a procura de fontes de energia renováveis e de baixas emissões de carbono é cada vez maior, motivada sobretudo pelos cenários de alterações globais. Um dos objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU é que a energia seja renovável e acessível a todos (7º Objetivo), até ao ano 2030. Para que esta meta seja cumprida é necessário encontrar e explorar novas fontes de energia mais limpas.

A geotermia é uma energia renovável e de baixas emissões de carbono, que utiliza o calor interno da Terra para produzir energia. O aproveitamento desta energia é promissor em regiões onde existe tectónica profunda ou elevado gradiente geotérmico, nomeadamente em regiões vulcânicas ativas do globo, como é o caso dos Açores.

Algumas ilhas do Arquipélago dos Açores têm potencial geotérmico elevado, como resultado da ocorrência de sistemas de alta e baixa entalpia, associados a vulcanismo e tectónica ativos. Recursos geotérmicos de alta entalpia são já utilizados nas ilhas Terceira e S. Miguel, para produção de energia elétrica. No entanto, os recursos de baixa entalpia que podem, por exemplo, ser utilizados para aquecimento (*district heating*) ainda estão pouco avaliados e explorados. Na ilha Terceira ocorrem águas termais perto da cidade de Angra do Heroísmo, que podem ser utilizadas como recurso geotérmico de baixa entalpia, mas cujo reservatório e recursos são ainda pouco conhecidos (Figura 1.1).

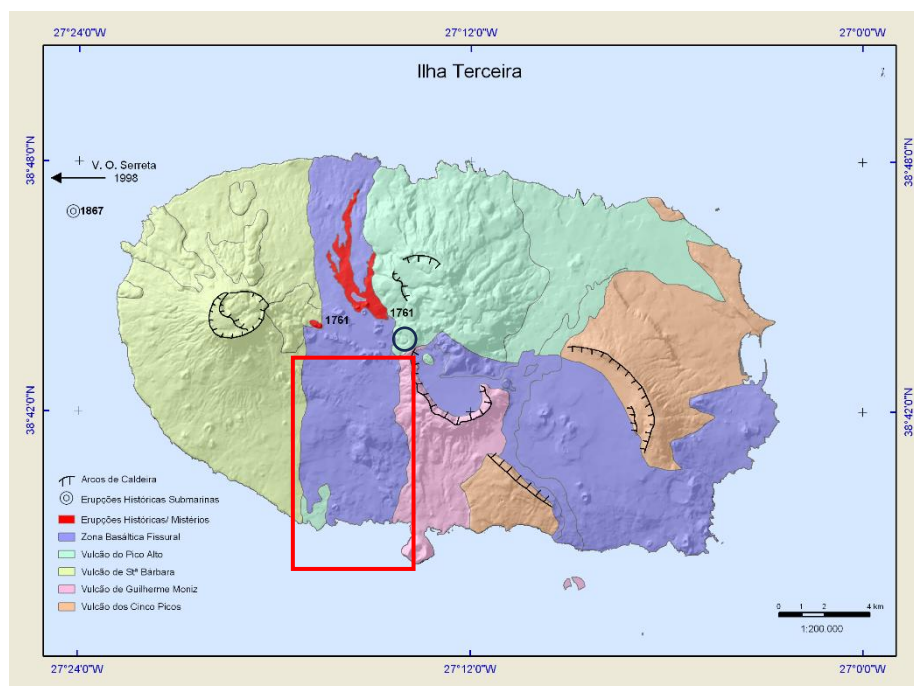


Figura 1.1 - Esboço Vulcano-estratigráfico da Ilha Terceira (In: Nunes, 2004). Retângulo inserido indica a área de estudo e circunferência a localização do campo fumarólico das Furnas do Enxofre.

2. Objetivos

O trabalho de investigação desenvolvido no âmbito desta dissertação tem como principal objetivo estudar o sistema geotérmico de baixa entalpia na região de Angra do Heroísmo, contribuindo para:

- Identificar e caracterizar os recursos hidrogeológicos e geotérmicos da zona de Angra do Heroísmo;
- Propor um modelo conceptual dos sistemas hidrogeológico e geotérmico de baixa entalpia;
- Quantificar os recursos hídricos subterrâneos;
- Avaliar o potencial dos recursos geotérmicos de baixa entalpia no aquífero termal de Angra do Heroísmo.

3. Estado de Arte sobre Geotermia

3.1 Definição de Geotermia

A geotermia pode considerar-se como o conjunto das ciências e técnicas que estudam e exploram o calor terrestre. Esta fonte de energia é renovável e de baixas emissões de carbono, e utiliza o calor interno da Terra para produzir energia. Ao contrário de outras fontes de energia renovável, apresenta elevada disponibilidade e pode ser utilizada de forma viável e quase contínua, o que reforça a sua importância num contexto de transição energética.

A fonte térmica associada à geotermia tem origem no calor primordial da formação da Terra, há cerca de 4,5 mil milhões de anos, nomeadamente no calor libertado pelo arrefecimento e cristalização do núcleo e no decaimento radioativo dos isótopos que constituem as rochas da crosta e do manto. Estima-se que estas fontes de energia libertem no total $4,2 \times 10^{12}$ Joule (DGEG, 2017), o que significa que a libertação de energia do interior da Terra ocorrerá durante vários milhares de milhões de anos, podendo considerar-se ilimitada à escala humana.

No entanto, este calor não está distribuído de forma homogênea pela superfície terrestre, uma vez que o movimento das placas tectónicas origina espessuras crustais diferentes (Figura 3.1). Este movimento contribui para a formação de cadeias montanhosas e consequente espessamento da crosta, ou rutura continental, incluindo a atividade vulcânica e adelgaçamento da crosta (Fink *et al.*, 2022). Esta heterogeneidade do espessamento crustal origina anomalias de gradiente geotérmico positivas e negativas, ou seja, zonas onde ocorrem variações no gradiente geotérmico normal. As zonas de gradiente normal apresentam uma variação média de 33 °C/km, no entanto as zonas de elevado gradiente geotérmico apresentam maior temperatura a menor profundidade. Um bom exemplo deste tipo de anomalia ocorre em ambientes tectónicos distensivos, como é o caso das cristas médio-oceânicas, onde há adelgaçamento crustal e o gradiente geotérmico pode atingir mais de 100 °C/km (Fink *et al.*, 2022).

Embora o fluxo de calor esteja essencialmente condicionado pelo gradiente geotérmico, a condutividade térmica das rochas é também um fator importante a se considerar, pois consiste na capacidade de as rochas conduzirem ou transportarem o calor. Como tal, existem dois mecanismos principais de transferência de calor: a condução e a convecção.

A condução de calor é um processo físico pelo qual o calor é transferido através de um material ou entre materiais que estão em contato direto entre si, está dependente do gradiente geotérmico e da condutividade térmica das rochas e, como tal, da sua composição. Este é o principal mecanismo de transferência de calor da crosta.

Ao contrário da condução, a convecção é um processo onde o calor é transportado pelo movimento das próprias partículas de um fluido, ou seja, fluidos quentes, água, gases ou magma. Para que este mecanismo ocorra e possa haver movimento de fluidos é necessário que o maciço rochoso apresente permeabilidade, sendo esta propriedade essencial para que haja convecção. Exemplos deste tipo de transferência de calor são a ascensão de magma e posterior instalação de um corpo intrusivo ou a circulação de fluidos em zonas de falha profunda que, quando ascendem à superfície, dão origem a fontes termais (Fink *et al.*, 2022).

De acordo com Fink *et al.* (2022) as zonas onde ocorrem anomalias positivas do gradiente geotérmico e elevado fluxo térmico são as mais interessantes do ponto de vista económico e favoráveis para a exploração geotérmica. Adicionalmente, a ocorrência de recurso geotérmico perto da superfície torna a acessibilidade e o desenvolvimento do recurso mais fácil e barato.

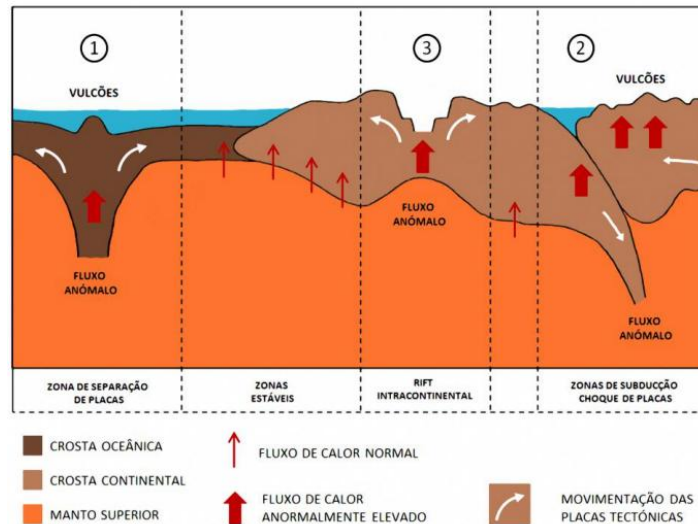


Figura 3.1 - Esquema da geodinâmica interna da Terra e repartição dos fluxos de calor de acordo com a estabilidade geológica da zona (In: DGEG, 2017).

3.2 Reservatórios geotérmicos e tipos de geotermia

Um reservatório geotérmico pode ser considerado uma estrutura constituída por rocha porosa ou fraturada que permite o armazenamento de um fluido quente, que posteriormente pode ser extraído e aproveitado. Para que este reservatório (Figura 3.2) apresente condições para a acumulação e posterior exploração de um recurso geotérmico é necessário a existência de: i) uma fonte de calor; ii) um fluido (habitualmente a água e/ou vapor de água) que transporte o calor do interior da Terra para a superfície; iii) um meio permeável que permita a circulação de um fluido (aquífero) e, consequentemente, o transporte do calor até à superfície (nomeadamente através de fraturas) e que permita o seu aproveitamento; iv) uma formação rochosa selante (impermeável ou de permeabilidade muito baixa), o “cap rock”, que preserve o calor dentro do reservatório e que evite a sua dissipação para a superfície. Os reservatórios geotérmicos podem ser classificados do ponto de vista económico ou geológico (Fink *et al.*, 2022), no entanto ambas as classificações têm como princípio base a temperatura do fluido no reservatório.

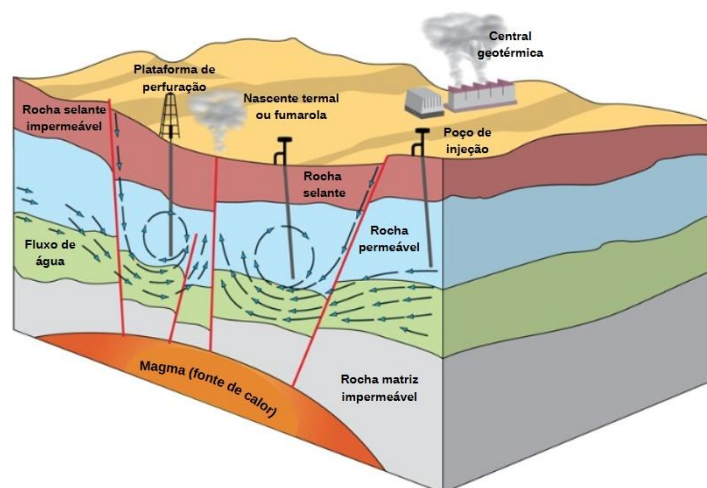


Figura 3.2 - Modelo Conceptual de Reservatório Geotérmico (adaptado de Lidsen, 2023).

Por outro lado, e segundo a legislação portuguesa (Dec.-Lei nº 54/2015, de 22 de junho), o recurso geotérmico define-se como sendo os “fluidos e as formações geológicas do subsolo, cuja temperatura é suscetível de aproveitamento económico”. Os recursos geotérmicos têm um elevado potencial económico, pois apresentam um potencial de aproveitamento muito vasto, desde a produção de energia elétrica, ao aquecimento (*district heating*), entre outros processos industriais (DGEG, 2017). Como tal, a classificação dos recursos geotérmicos atualmente utilizada é uma classificação económica, que segundo DGEG (2017) se baseia nas diferentes temperaturas dos reservatórios associados e se divide em:

- Alta entalpia (temperatura superior a 150 °C);
- Media entalpia (temperatura entre 100 °C e 150 °C);
- Baixa entalpia (temperatura entre 30 °C e 100 °C);
- Muito baixa entalpia (temperatura inferior a 30 °C).

Carvalho & Carvalho (2004) dividem os recursos geotérmicos em Geotermia Tradicional, com reservatórios de alta entalpia e de baixa entalpia e Nova Geotermia, sendo esta última a geotermia superficial, com temperaturas muito baixas.

Os reservatórios geotérmicos são definidos com base na fonte do calor associada e para que estes sejam passíveis de aproveitamento recorre-se a diversas tecnologias que permitam a sua utilização, tecnologias estas que estão dependentes do tipo de sistema geotérmico presente.

Um sistema geotérmico é definido pelos componentes e processos que permitem a captura, conversão e utilização da energia térmica proveniente do interior da Terra. Tendo em conta que os sistemas geotérmicos estão dependentes das condições geológicas existentes, existem vários tipos de sistemas geotérmicos. Embora todos os sistemas apresentem características comuns, apresentam também características que os distinguem. Estes estão divididos em sistemas convencionais (Figura 3.3) e sistemas não convencionais (Figura 3.4) e segundo Gupta & Roy (2007) são classificados em:

- Sistema húmido de vapor dominante: este sistema convencional é caracterizado por apresentar água a altas pressões e temperaturas (superiores a 100 °C) (Gupta & Roy, 2007). À medida que a água circula até à superfície, devido à diminuição da pressão, dá-se a ebulição produzindo vapor húmido (mistura de vapor com água) ou um vapor seco (vapor saturado). O vapor húmido apresenta maior

percentagem de água enquanto o vapor seco consiste num vapor superaquecido. A relação vapor/água varia de um local para outro.

- Sistema húmido de água dominante: este sistema convencional é caracterizado por apresentar um transporte convectivo do calor e por conter água na fase líquida, devido à pressão a que está sujeito. O transporte de calor para a superfície é feito através da circulação de água aquecida em profundidade por condução de calor das rochas quentes. Neste tipo de sistema as temperaturas variam entre 60 e 100 °C e ocorrem a profundidades entre 1500 e 3000 m (Gupta & Roy, 2007). Ao contrário dos restantes sistemas, este pode desenvolver-se na ausência de uma rocha selante/*cap rock*, desde que se mantenha a circulação convectiva.
- Sistema seco estimulado (HDR - *Hot Dry Rock* ou EGS - *Enhanced Geothermal Systems*): os sistemas secos (sistema não convencional) não apresentam naturalmente um fluido que transporte o calor para a superfície. Os sistemas secos são, assim, sistemas onde apenas existe rocha quente, mas onde a água está ausente devido à falta de permeabilidade das rochas do reservatório, impossibilitando o transporte de calor para a superfície. Para a exploração destes sistemas geotérmicos não convencionais é necessário recorrer a fracturação hidráulica, a qual envolve a injeção de água fria a alta pressão no reservatório (Figura 3.4). O fluido injetado, quando em contacto com a rocha quente, provoca a fraturação hidráulica da rocha, aumenta a sua permeabilidade e, por condução, aquece e transporta o calor até à superfície. No entanto, a exploração deste tipo de reservatórios nem sempre é viável do ponto de vista económico.

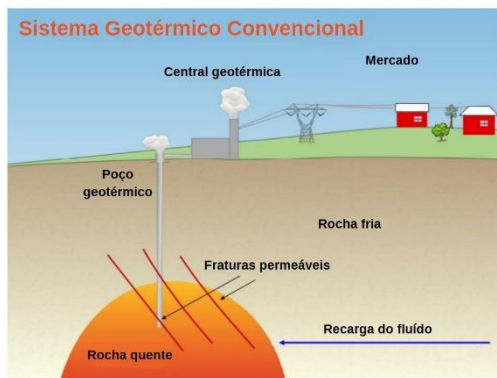


Figura 3.3 - Sistema geotérmico convencional (adaptado de Flóvez, 2008).

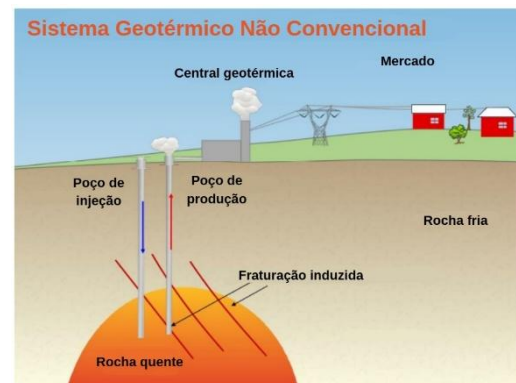


Figura 3.4 - Sistema geotérmico não convencional (adaptado de Flóvez, 2008).

O calor presente nos fluidos geotérmicos pode ser utilizado na sua totalidade, tal como previsto no aproveitamento em cascata de Lindal (1973), (Figura 3.5), o qual define diferentes usos para o fluido termal, em função da sua temperatura.

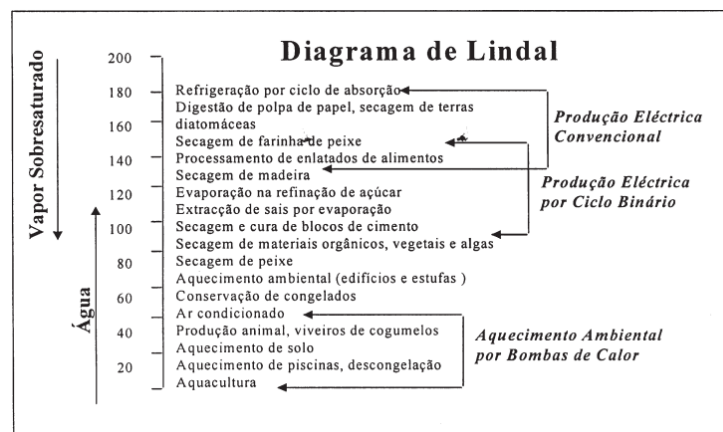


Figura 3.5 - Diagrama de Lindal com o aproveitamento dos recursos geotérmicos em cascata (In: Carvalho & Carvalho, 2004).

Em geotermia de alta entalpia, o calor do fluido é fonte para a produção de energia elétrica, através da utilização de turbinas em centrais geotérmicas de vapor seco, em centrais geotérmicas de vapor *flash*, ou em centrais geotérmicas de ciclo binário, dependendo do tipo de fluido explorado.

As centrais de produção de energia elétrica a partir de vapor (vapor seco ou vapor *flash*), utilizam recursos a temperatura acima de 150 °C (vapor à pressão atmosférica). A tecnologia a vapor seco (Figura 3.6) é utilizada quando está disponível vapor a alta temperatura; a tecnologia *flash* (Figura 3.7) é utilizada quando há mistura vapor+água.

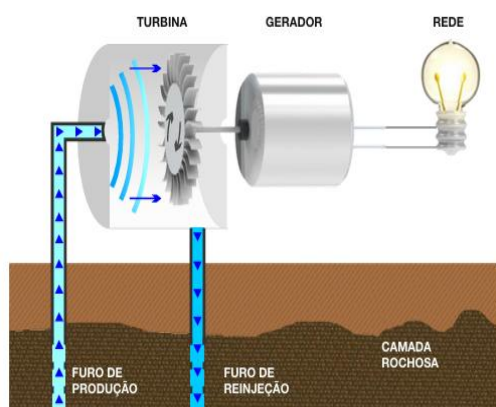


Figura 3.6 - Esquema de funcionamento de uma turbina para produção de energia elétrica a partir de vapor seco (In: DGEG, 2017).

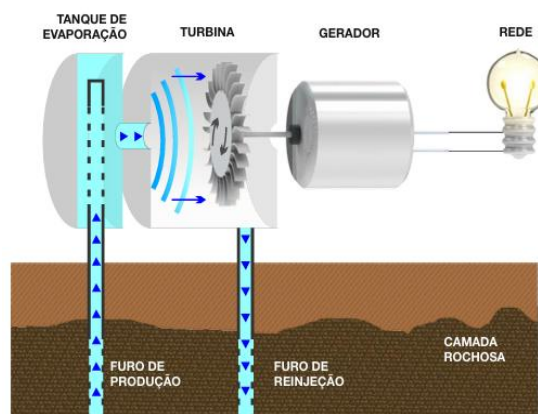


Figura 3.7 - Esquema de funcionamento de uma turbina para produção de energia elétrica a partir de vapor húmido (In: DGEG, 2017).

Para a produção de energia elétrica a partir de fluidos com temperaturas superiores a 100 °C (média entalpia e alta entalpia) são utilizadas centrais com tecnologia de ciclo binário (Figura 3.8) (DGEG, 2017). Esta tecnologia utiliza um fluido secundário que entra em ebulição a temperaturas mais baixas, e o vapor resultante faz movimentar uma turbina que produz eletricidade. Este tipo de tecnologia tem um elevado potencial de crescimento, visto que os recursos geotérmicos com temperaturas inferiores a 150 °C são os mais comuns no planeta.

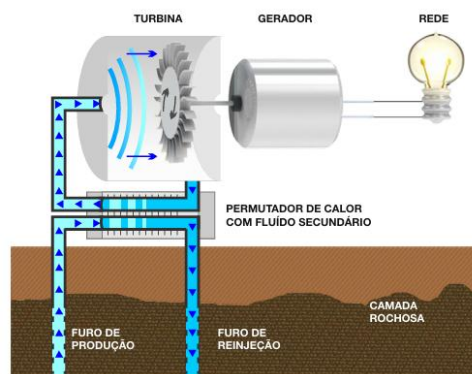


Figura 3.8 - Esquema de funcionamento de uma turbina para produção de energia elétrica em ciclo binário (In: DGEG, 2017).

O principal potencial dos recursos geotérmicos de baixa entalpia é o da utilização direta do calor geotérmico como fonte de calor, ou seja, aproveitando diretamente o calor do fluido. Este tipo de geotermia é aproveitado há vários séculos em balneologia e balneoterapia. No entanto, pode ter uma grande variedade de aplicações como exemplificado no Diagrama de Lindal (Figura 3.5), tais como o aquecimento de edifícios (*district heating*), de piscinas, estufas e até aplicações industriais (Carvalho & Carvalho, 2004). Nos dias de hoje, já é possível produzir energia elétrica a partir de reservatórios geotérmicos de baixa entalpia, com o recurso a centrais com sistemas binários (Stober & Bucher, 2021).

A geotermia superficial, ou Nova Geotermia, ou geotermia de muito baixa temperatura, consiste no aproveitamento do potencial calorífico do solo e do subsolo. Este recurso encontra-se a pequena profundidade e é aproveitado com o recurso a bombas de calor (Figura 3.9), sendo uma alternativa interessante para fins que não necessitem de elevadas temperaturas.

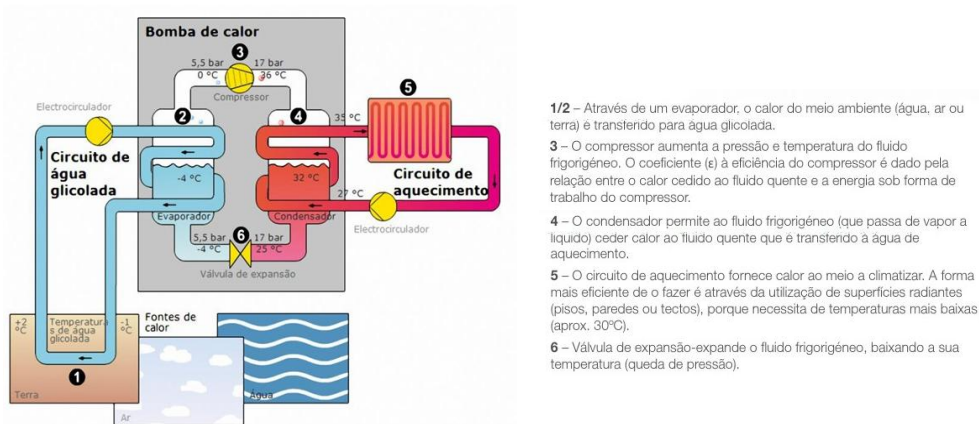


Figura 3.9 - Bomba de calor e seus principais componentes (In: DGEG, 2017).

O aproveitamento desta energia superficial através de sistemas de bombas de calor já é conhecido há vários anos, sendo estes sistemas utilizados essencialmente para climatização (aquecimento ou arrefecimento) de edifícios. A procura de energias limpas nos últimos anos e a necessidade de promover o aproveitamento dos recursos energéticos endógenos impulsionaram a utilização e desenvolvimento de bombas de calor geotérmicas.

A transferência de calor do solo, ou para o solo, pode ser efetuada em sistemas fechados através de permutadores de calor enterrados (vertical ou horizontalmente), ou incorporados nas fundações do edifício, ou através de sistemas abertos com a extração de água subterrânea que troca calor com um permutador de calor na superfície, sendo posteriormente injetada no aquífero (DGEG, 2017). A Figura 3.10 representa esquematicamente cada um dos sistemas acima mencionados.

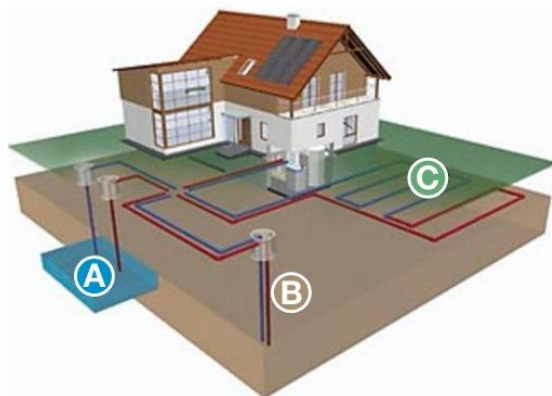


Figura 3.10 - Representação esquemática de sistemas geotérmicos superficiais abertos (A), fechados verticais (B) e fechados horizontais (C), (In: DGEG, 2017).

3.3 Resenha histórica da geotermia

A utilização de energia geotérmica como fonte de calor remonta a milhares de anos e por várias civilizações e povos, como os Celtas, Romanos, Japoneses, Turcos, Islandeses e Maori/Nova Zelândia (Stober & Bucher, 2021). Estes povos utilizavam as ocorrências superficiais, sob a forma de nascentes termais, que eram conduzidas a piscinas para banhos e tratamentos de saúde e, nalguns casos, para cozinhar. A utilização deste recurso era considerada divina, pois acreditavam que estas águas teriam poderes curativos. Nas civilizações Romana, Otomana e Dinastia Chinesa as termas eram locais de convívio social, político e cultural. A Balneologia e a Balneoterapia foram, assim, o principal uso deste recurso durante milhares de anos.

Apenas na segunda metade do século XIX, graças aos rápidos avanços da termodinâmica, deu-se início à produção de energia proveniente das águas termais. Estes avanços permitiram a conversão do potencial calorífico destas águas em energia de uma forma eficiente, utilizando o vapor de água. Inicialmente produzia-se energia mecânica, que depois evoluiu para a produção de energia elétrica, com a utilização de geradores e turbinas.

A primeira central de conversão de energia geotérmica foi instalada em 1827, em Larderello, Itália. A instalação desta central estava associada à indústria de exploração de Boro a partir de águas termais que ocorriam na região. O aproveitamento da energia geotérmica e consequente implementação da central apenas ocorreu porque já estava implantada a exploração de Boro. A central aproveitava o vapor resultante da extração de Boro das águas termais para alimentar as bombas e máquinas. Em 1904, através do acoplamento de uma máquina a vapor a um gerador, foi produzida a primeira energia elétrica a partir de uma fonte de energia geotérmica (Stober & Bucher, 2021).

O primeiro aproveitamento sistemático do calor geotérmico para *district heating* (isto é, a utilização do calor geotérmico para aquecimento de edifícios) ocorreu em Boise, Idaho, Estados Unidos da América,

Estes desenvolvimentos levaram a que, entre 1958 e 1960, países como a Nova Zelândia, o México e os Estados Unidos da América (EUA) implantassem centrais geotérmicas para o aproveitamento deste recurso.

3.4 Geotermia no Mundo

A world map with a light gray background. Each of the 100 countries is represented by a small green dot. The map includes labels for major countries and oceans. The countries labeled are: Canada, United States, Mexico, Colombia, Peru, Brazil, Argentina, Chile, Bolivia, Paraguay, Uruguay, Venezuela, Ecuador, Guyana, Suriname, French Guiana, Greenland, Iceland, Norway, Sweden, Finland, Denmark, Poland, Czech Republic, Slovakia, Austria, Hungary, Switzerland, Germany, France, Belgium, Netherlands, Luxembourg, United Kingdom, Ireland, Spain, Portugal, Greece, Turkey, Cyprus, Georgia, Armenia, Azerbaijan, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Uzbekistan, Mongolia, China, Taiwan, South Korea, North Korea, Japan, Philippines, Vietnam, Laos, Cambodia, Thailand, Myanmar, Malaysia, Singapore, Brunei, Indonesia, Timor-Leste, Papua New Guinea, Solomon Islands, Vanuatu, Fiji, Tonga, Samoa, Tokelau, Kiribati, Tuvalu, Nauru, Marshall Islands, Micronesia, Palau, and New Zealand. The oceans labeled are: North Pacific Ocean, North Atlantic Ocean, South Pacific Ocean, South Atlantic Ocean, Indian Ocean, and Arctic Ocean.

21

Segundo Stober & Bucher (2021), os EUA têm uma capacidade instalada de produção de eletricidade com fonte geotérmica de 3,7 GWe, sendo o país líder na utilização de energia geotérmica para a produção de energia elétrica, com a maior parte da produção localizada na Califórnia (2,9 GWe). Atualmente, na Europa estão operacionais mais de 100 centrais geotérmicas, onde são produzidos cerca de 2,5 GWe de eletricidade. Cerca de metade destas centrais funcionam a vapor seco, operando 20 delas a vapor *flash* e 30% com ciclo binário (Stober & Bucher, 2021). No entanto o aproveitamento e a tecnologia utilizada em cada país diferem consoante a disponibilidade do recurso. Metade das centrais europeias encontram-se instaladas em Itália e na Islândia, sendo todas estas centrais a vapor seco, dadas as condições geológicas existentes.

No final de 2023 contabilizavam-se 30 países a produzir eletricidade através de energia geotérmica, estando representados na Tabela 3.1 os 10 com maior capacidade de produção instalada, representando 93% da capacidade total instalada no mundo, com a produção de 16,335 MWe.

Tabela 3.1 - Países com maior capacidade de geração de energia geotérmica no final de 2023 (adaptado de ThinkGeoEnergy, 2025).

País	Capacidade (MWe)
Estados Unidos da América	3900
Indonésia	2418
Filipinas	1952
Turquia	1691
Nova Zelândia	1042
Quênia	985
México	976
Itália	916
Islândia	754
Japão	576
Outros	1125

Sob a perspetiva dos usos diretos da energia geotérmica (nomeadamente em *district heating*, estufas e balneologia/balneoterapia), no final de 2019, 88 países realizavam o aproveitamento da mesma, com uma capacidade total estimada de geração térmica instalada de aproximadamente 107.727 MWth (megawatts térmicos). Na Tabela 3.2 estão representados os países com maior capacidade instalada relativamente aos usos diretos da energia geotérmica, não incluindo o uso em bombas de calor.

Tabela 3.2 - Capacidade instalada nos países com maiores usos diretos da energia geotérmica (excluindo bombas de calor), no final de 2019 (adaptado de ThinkGeoEnergy, 2025).

País	Capacidade (MWth)
China	14160
Turquia	3480
Japão	2407
Islândia	2368
Hungria	952
Outros	6813

Como mencionado, as condições geológicas ocorrentes em cada região ou país influenciam diretamente a dimensão e o tipo de aproveitamento do recurso geotérmico, de que resulta uma variação no tipo de utilização e dos valores de produção de energia geotérmica num dado país. Um bom exemplo desta influência, segundo Stober & Bucher (2021), é a pequena utilização de energia geotérmica profunda ou de alta entalpia na Alemanha em comparação com países como a Islândia, EUA ou a Nova Zelândia,

uma vez que não existem campos de alta entalpia na Europa Central. Em contrapartida, a Alemanha apresenta importantes aproveitamentos de geotermia superficial ou de baixa entalpia.

Embora a produção de energia elétrica através dos recursos geotérmicos consista maioritariamente no aproveitamento de geotermia de alta entalpia, por ser mais apelativo do ponto de vista económico, é também possível o aproveitamento de geotermia superficial ou de baixa entalpia para gerar energia elétrica. Um elevado e crescente número de países, que apenas tem acesso a recursos de baixa entalpia, está atualmente a produzir eletricidade a partir destes recursos. Um exemplo relevante é a Turquia, com uma capacidade instalada de geração de energia de cerca de 1663 MW, em agosto de 2021 (ThinkGeoEnergy, 2025).

Embora o potencial e o aproveitamento dos recursos geotérmicos esteja dependente, entre outros fatores, da qualidade do mesmo e de fatores económicos, pode afirmar-se que não há ainda, à escala global, uma aproveitamento integral das reservas disponíveis. Na Islândia, por exemplo, líder no uso de energia geotérmica para diversos usos, cerca de 30% da eletricidade do país é gerada através da geotermia, sendo a restante de origem hidroelétrica. Outros países, como a Indonésia, o Japão e os EUA, que também são grandes produtores de eletricidade proveniente da geotermia, estão também a explorar apenas uma fração do seu potencial em termos de recursos geotérmicos.

3.5 Geotermia nos Açores

O Arquipélago dos Açores é formado por nove ilhas oceânicas situadas no Oceano Atlântico, na junção tripla das placas tectónicas Norte-Americana, Euroasiática e Africana. As ilhas encontram-se distribuídas ao longo de uma faixa com cerca de 600 km de extensão segundo a direção WNW-ESE, e apresentam uma atividade sísmica e vulcânica significativas. Atualmente apresentam manifestações de vulcanismo secundário, como nascentes, poços e furos de águas termais e gasocarbónicas, bem como campos fumarólicos e zonas de desgaseificação difusa.

Os Açores apresentam um elevado potencial geotérmico, devido à sua natureza geológica, que juntamente com a intensa fracturação associada à tectónica e à sismicidade significativas, potenciam a existência de reservatórios geotérmicos de alta entalpia em várias ilhas do arquipélago açoriano, nomeadamente nas ilhas S. Miguel, Terceira, Graciosa, Pico e Faial (DGEG, 2017). Aos sistemas de alta entalpia associam-se, na sua dependência, outros sistemas de baixa entalpia, que se manifestam à superfície por numerosas nascentes termais e fumarolas.

Nas ilhas de S. Miguel e Terceira os sistemas geotérmicos de alta entalpia, associados ao Vulcão do Fogo (campo geotérmico da Ribeira Grande) e ao Vulcão do Pico Alto (campo geotérmico do Pico Alto), respetivamente, são explorados para produção de energia elétrica.

O aproveitamento dos recursos geotérmicos de alta entalpia para a produção de energia elétrica teve início em 1980 no flanco norte do Vulcão do Fogo (campo geotérmico da Ribeira Grande), ilha de S. Miguel, com a construção da Central piloto do Pico Vermelho, que apresentava uma capacidade instalada de 3 MW (DGEG, 2017). No entanto, o aproveitamento da geotermia à escala industrial apenas ocorreu após 1994, com a Central Geotérmica da Ribeira Grande, com capacidade instalada inicial de 5,8 MW (DGEG, 2017).

Atualmente, no campo geotérmico da Ribeira Grande existem 11 poços de produção (CL1, CL2, CL3, CL5, CL6, CL7, PV2, PV3, PV4, PV7 e PV8) e 7 poços de reinjeção (CL4, CL4A, PV5, PV6, PV9, PV10 e PV11), que asseguram o funcionamento das centrais geotérmicas de ciclo binário da Ribeira Grande (que produz 13 MWe) e do Pico Vermelho (que produz 10 MWe), com uma capacidade instalada

total de 27,8 MW (DGEG, 2017, Nunes *et al.*, 2020). O sistema geotérmico é do tipo água dominante e as temperaturas do reservatório variam entre 142 °C e 203 °C (DGEG, 2017).

Na ilha Terceira, o sistema geotérmico de alta entalpia associado ao vulcão do Pico Alto é explorado através de 3 poços de produção (PA2, PA3 e PA4) e 1 poço de reinjeção (PA8), ligados à Central Geotérmica de ciclo binário do Pico Alto, que produz cerca de 3 MWe, com uma capacidade instalada total de 4 MW (Nunes *et al.*, 2020, 2023). O reservatório explorado é do tipo vapor dominante e apresenta temperaturas em profundidade entre 263 °C e 283 °C.

Em conjunto, as três centrais geotérmicas açorianas produziram 20,5% da eletricidade gerada nos Açores entre janeiro e novembro de 2024 (EDA, 2024a), sendo que a produção de energia geotérmica em São Miguel (Figura 3.12) totalizou nesse período 155,2 GWh, correspondendo a 35,2% do total de energia elétrica produzida na ilha, e totalizou 6,9 GWh na ilha Terceira (Figura 3.13), o que corresponde a 3,7% do total de energia elétrica produzida na ilha. Atualmente está em curso um programa de investimentos por parte da EDA Renováveis S.A. (empresa que detém as concessões geotérmicas nos Açores), que inclui a realização de nove novos poços geotérmicos nas ilhas São Miguel e Terceira (já concluídos) e a instalação de novos módulos/turbinas visando um aumento da potência útil das centrais existentes. No final, prevê-se dispor de uma capacidade de produção total instalada nas três centrais geotérmicas dos Açores da ordem de 43 MW (EDA, 2024b).

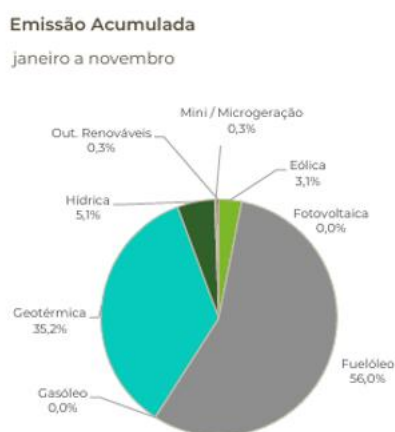


Figura 3.12 - Energia elétrica produzida na ilha de São Miguel de janeiro a novembro de 2024 e contributo das energias renováveis, incluindo energia geotérmica (EDA, 2024a).



Figura 3.13 - Energia elétrica produzida na ilha Terceira de janeiro a novembro de 2024 e contributo das energias renováveis, incluindo energia geotérmica (EDA, 2024a).

No que diz respeito aos sistemas geotérmicos de baixa entalpia, a sua ocorrência é conhecida em todas as ilhas do arquipélago, com exceção das ilhas Corvo e Santa Maria, associados a nascentes e furos termais, que apresentam temperaturas entre 22 e 98 °C, a maioria das quais localizadas na “Hidrópole das Furnas” (DGEG 2017). No entanto, os aproveitamentos geotérmicos de baixa entalpia estão atualmente confinados aos complexos vulcânicos das Furnas, do Fogo e das Sete Cidades, na ilha de S. Miguel e no Carapacho, na ilha Graciosa.

O INOVA – Instituto de Inovação Tecnológica dos Açores, em estreita articulação com o Governo dos Açores, tem vindo a desenvolver desde 2004 várias iniciativas e estudos que permitam a exploração sustentada e a valorização dos recursos geotérmicos de baixa entalpia dos Açores, a par do uso das águas termais associadas a diversas infraestruturas balneológicas (Nunes *et al.*, 2021). Atualmente, são sete os espaços termais em utilização nos Açores, sobretudo em contexto balneológico e na vertente de bem-

estar: Ferraria, Caldeira Velha, Caldeiras da Ribeira Grande, Poça da Dona Beija, Parque/Hotel Terra Nostra e Quenturas/Hotel Octant Furnas, na ilha de São Miguel e Carapacho, na ilha Graciosa.

No que diz respeito ao futuro da produção de energia elétrica a partir da geotermia nos Açores, este está depende de diversos fatores, sobretudo aos associados ao consumo e armazenamento de energia, bem como do desenvolvimento económico e social das ilhas de São Miguel e Terceira. No entanto, para além destas ilhas, existe espaço para aproveitamento desta energia noutras ilhas do arquipélago, incluindo para a produção de energia elétrica a partir de recursos com temperaturas na gama de 70-98 °C (DGEG, 2017). A geotermia superficial, por seu turno, e não obstante o potencial associado, não tem tido uma implementação relevante nos Açores, sobretudo por razões culturais e climáticas, mas tem havido um crescente interesse no seu aproveitamento no âmbito da climatização de edifícios, englobando sistemas de ar condicionado, aquecimento e desumidificação, de que são exemplo o aproveitamento de águas termais em sistemas de AQS - águas quentes sanitárias em hotéis nas Furnas, ilha de São Miguel (Nunes *et al.*, 2023).

4. Caracterização da área de estudo: a ilha Terceira

4.1 Enquadramento geográfico

A área de trabalho da presente dissertação, com cerca de 35 km², está implantada no concelho de Angra do Heroísmo, na ilha Terceira, segundo uma faixa de orientação geral N-S (Figura 4.1) e declive geral para sul, que se estende, grosso modo, desde a parte central da ilha até ao litoral e entre a cidade de Angra do Heroísmo e a localidade de São Bartolomeu.

A ilha Terceira integra o Grupo Central do arquipélago dos Açores, localizado na região Nordeste do Oceano Atlântico e composto por 9 ilhas, distribuídas em 3 grupos geográficos distintos. A ilha das Flores e a ilha do Corvo pertencem ao Grupo Ocidental, as ilhas do Faial, do Pico, da Graciosa, Terceira e São Jorge pertencem ao Grupo Central, enquanto o Grupo Oriental integra as ilhas de São Miguel e de Santa Maria (Figura 4.1).

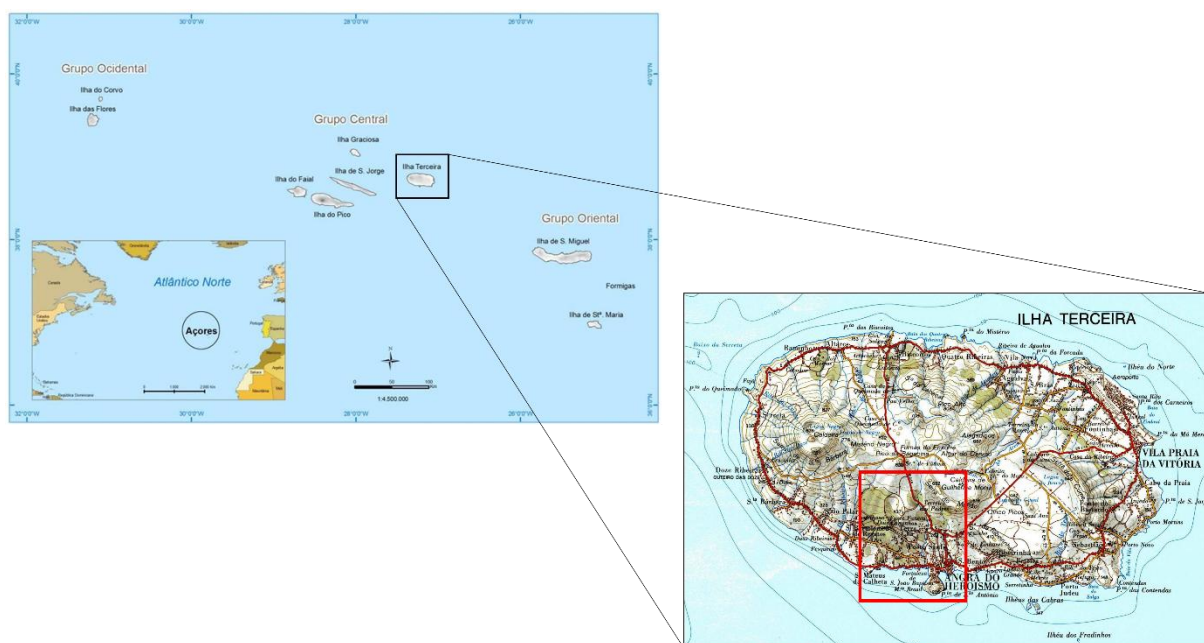


Figura 4.1 - Enquadramento geográfico da área de estudo (adaptado de DROTRH, 2021a e IGC, 1971).

4.2 Enquadramento geoestrutural

A ilha Terceira é uma das nove ilhas constituintes do Arquipélago dos Açores, com uma área de 402 km², integra o designado “Rifte da Terceira”, uma estrutura tectónica do tipo transformante *leaky*, com cerca de 600 km de extensão segundo uma direção geral WNW-ESE. Esta importante estrutura tectónica faz a ligação entre a Crista Médio Atlântica e a Falha Gloria (Figura 4.2) e integra o ramo leste da junção tripla dos Açores, entre as placas litosféricas Euroasiática, Norte-Americana e Africana (Nunes, 2000).

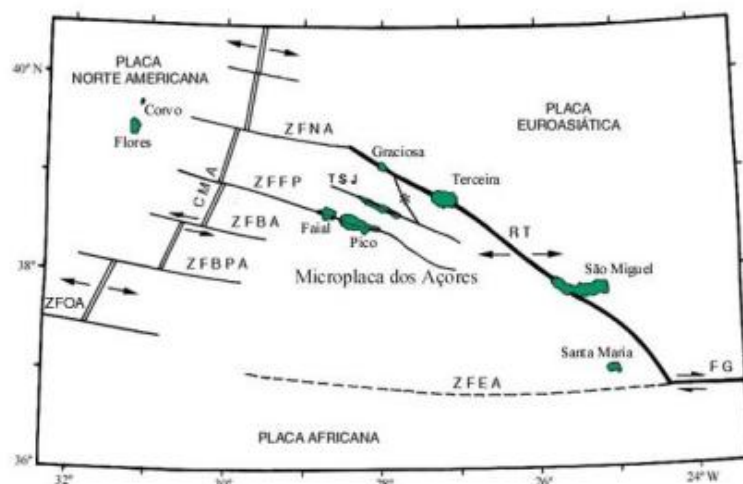


Figura 4.2 - Enquadramento geoestrutural do Arquipélago dos Açores e da ilha Terceira; Legenda: CMA - Crista Médio-Atlântica; RT - Rifte da Terceira; ZFNA - Zona de Fratura Norte dos Açores; ZFEA - Zona de Fratura Este dos Açores; ZFOA - Zona de Fratura Oeste dos Açores; ZFBPA - Zona de Fratura Banco Princesa Alice; ZFBA - Zona de Fratura Banco Açores; FG - Falha Glória; ZFFP - Zona de Fratura Faial-Pico; TSJ - Transformante de São Jorge (In: Nunes, 1999).

4.3 Geomorfologia

Do ponto de vista geomorfológico a ilha é marcada pelo alinhamento de quatro edifícios vulcânicos principais do tipo vulcão poligenético, que se encontram alinhados segundo uma orientação aproximada WNW-ESE a NW-SE (Pacheco *et al.*, 2013), controlada pelo posicionamento do Rifte da Terceira. Estes centros eruptivos principais da ilha incluem o Vulcão dos Cinco Picos, o Vulcão de Guilherme Moniz, o Vulcão de Santa Bárbara e o Vulcão do Pico Alto, a que acresce uma zona de vulcanismo fissural de natureza basáltica, implantada na parte central e na parte SE da ilha Terceira (Figura 4.3), a designada Zona Fissural Basáltica.

O Vulcão dos Cinco Picos, na parte oriental da ilha, apresenta uma morfologia suave e uma caldeira de subsidência muito erodida, com 6,7 km de diâmetro. O interior da caldeira corresponde a uma zona aplanada com alguns cones de escórias alinhados NW-SE, sendo o Pico do Malhão o de maior altitude (482 m) (Zbyszewski *et al.*, 1971). Os bordos da caldeira representam vertentes suaves e correspondem à Serra do Cume, no bordo leste e à Serra da Ribeirinha, no bordo sudoeste. O vulcão poligenético de Guilherme Moniz está circunscrito à região centro meridional da ilha, na zona de Angra do Heroísmo, e é encimado por uma caldeira de subsidência, alongada segundo uma direção NW-SE e dimensão 4 x 2,5 km (Nunes, 2000). Enquanto o interior, aplanado, desta caldeira está coberto por escoadas lávicas recentes da Zona Basáltica Fissural, o seu bordo norte foi totalmente coberto por domos e *coulées* associadas ao Vulcão do Pico Alto. A parede sul desta caldeira está melhor expressa na Serra do Morião, de altitude máxima 632 m.

O Vulcão de Santa Bárbara, com altitude de 1021 m (o ponto mais alto da ilha Terceira), domina o sector ocidental da ilha, em cujo topo ocorreram importantes colapsos que levaram à formação de uma caldeira dupla, a mais antiga alongada segundo W-E e com dimensões aproximadas de 2,5 x 2 km (Nunes, 2000). O interior desta caldeira e o de uma segunda caldeira de subsidência (de contorno irregular e diâmetro inferior a 2 km) estão quase totalmente preenchidos por domos e *coulées*.

O Vulcão do Pico Alto domina toda a área centro-setentrional da ilha Terceira, desde a região de Biscoitos – Quatro Ribeiras até à freguesia de Lajes. A morfologia deste vulcão poligenético é caracterizada por dezenas de domos e coulées que definem importantes alinhamentos vulcano-tectónicos de orientação geral NW-SE e ENE-WSW (Nunes, 2000). Os bordos da caldeira de subsidência existente no topo deste vulcão estão atualmente melhor preservados na região do Juncal e da Serra do Labaçal, tendo sido totalmente obliterados nas restantes zonas por domas e *coulées* recentes.

A Zona Basáltica Fissural, de relevo suave e declives pouco acentuados, é caracterizada por um conjunto de cerca de 70 vulcões monogenéticos (na sua maioria cones de escórias) e escoadas lávicas associadas, edificados na sequência de erupções de baixa a moderada explosividade, sobretudo do tipo havaiano e estromboliano (Nunes, 2000). Estes cones, que definem diversos alinhamentos de orientação geral NW-SE a WNW-ESE, estão localizados quer na região central da ilha Terceira, quer no seu extremo SE, incluindo no interior da Caldeira dos Cinco Picos (Figura 4.3).

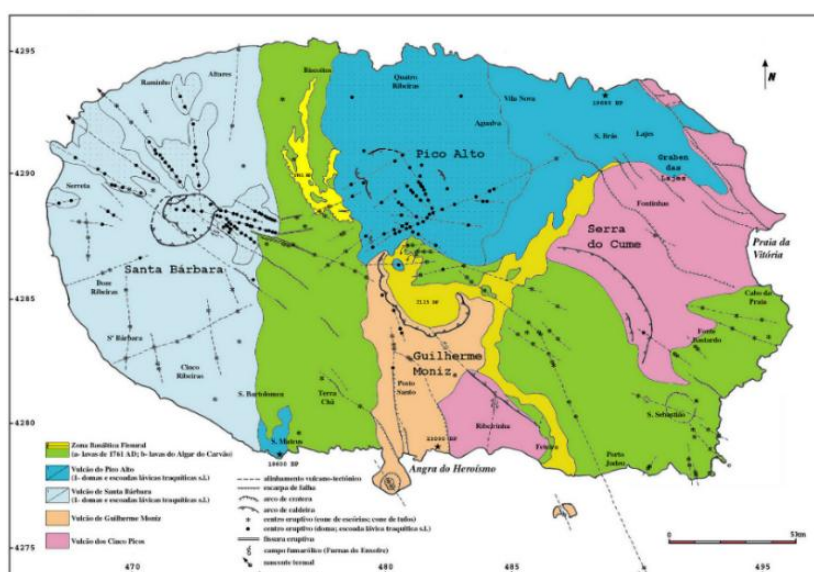


Figura 4.3 - Esboço Vulcano-tectónico da Ilha Terceira (Nunes, 2000).

4.4 Vulcanologia

A ilha Terceira é constituída por rochas de natureza traquíticas, traquibasálticas e basálticas resultantes de várias erupções vulcânicas. A composição destas rochas é muito variada, desde basaltos alcalinos porfíricos (com fenocristais de olivina e augite), até traquitos comendíticos e panteleritos, incluindo igualmente havaítos, mugearitos e benmoreitos (Self, 1982). Os produtos vulcânicos emitidos são maioritariamente de idade quaternária e apresentam uma grande variedade, incluindo ignimbritos, depósitos pomíticos de queda, escoadas lávicas siliciosas, escórias, *spatters* e escoadas lávicas basálticas *s.l.* e, ainda, tufos surtseianos (Self, 1982).

Conforme antes referido, a ilha Terceira é constituída por quatro vulcões poligenéticos e uma zona fissural basáltica que, de acordo com Nunes (2000), por ordem decrescente de idade são (Figura 4.3): o Vulcão dos Cinco Picos; o Vulcão de Guilherme Moniz; o Vulcão de Santa Bárbara; o Vulcão do Pico Alto; a Zona Basáltica Fissural.

O Vulcão dos Cinco Picos, é caracterizado por uma alternância de escoadas lávicas e depósitos piroclásticos, incluindo importantes ignimbritos, genericamente de natureza traquítica comendítica, que representam as formações mais antigas da ilha (França *et al.*, 2003). Segundo Self (1982), a pedra pomes de queda e os ignimbritos foram extensivamente cobertos, nalgumas áreas, por escoadas lávicas e escórias mais recentes da Zona Basáltica Fissural, como é o caso da extensa área aplanada do interior da sua caldeira, ou da parte SE da ilha Terceira, na zona de São Sebastião – Fonte do Bastardo.

O vulcão poligenético de Guilherme Moniz é constituído por depósitos pomíticos de queda e um conjunto de espessas escoadas lávicas do tipo domo e *coulée*, de traquitos comendíticos (Self, 1982), enquanto escoadas lávicas havaíticas afloram sobretudo ao longo do litoral, na zona de Angra do Heroísmo. Embora a sua morfologia tenha sido fortemente erodida, é possível identificar cerca de dez domos no Vulcão de Guilherme Moniz, além de um número semelhante de centros eruptivos basálticos. Entre estes, destacam-se os cones de tufos de Monte Brasil e do Ilhéu das Cabras, formados por erupções freatomagmáticas do tipo surtseiano. O "ignimbrito de Angra" (Self, 1982), de composição comendítica e que aflora na área de Angra do Heroísmo (Castelinho), apresenta uma datação por carbono-14 de aproximadamente 23.000 anos BP, estando geralmente relacionado a uma atividade explosiva do tipo pliniano, centrada no Vulcão de Guilherme Moniz (Nunes, 2000).

O Vulcão de Santa Bárbara é caracterizado por um vulcanismo básico inicial (predominantemente do tipo mugarítico e havaítico), que posteriormente evoluiu para um vulcanismo silicioso e mais explosivo, que originou espessos depósitos pomíticos de queda, *coulées* e domos traquíticos *s.l.* (Nunes, 2000). Instalados ao longo de fracturas com direcção geral NW-SE e em falhas radiais nos flancos do edifício vulcânico principal, encontram-se 85 domos e centros emissores associados a *coulée*, bem como diversos cones de escórias. De acordo com Nunes (2000) as formações mais antigas deste vulcão datam de 0,51 Ma, 1,15 Ma e 1,24 Ma, enquanto Feraud *et al.* (1980) atribuem uma idade inferior a 29.000 anos para a formação da caldeira mais antiga do vulcão de Santa. Bárbara.

O Vulcão do Pico Alto aflora na zona centro-norte da ilha e é caracterizado pela emissão de volumosas escoadas lávicas do tipo *coulée* e domos de natureza traquítica e pantelerítica (Nunes, 2000). No interior da sua caldeira encontram-se cerca de 60 domos e *coulées*, que definem importantes alinhamentos vulcano-tectónicos de orientação geral NW-SE e ENE-WSW (Nunes, 2000), como é o caso daquele que inclui o campo fumarólico das Furnas do Enxofre (cf. Figura 4.3). Segundo Self (1982) a idade máxima deste vulcão poligenético é de 100.000 anos e o seu vulcanismo mais recente data de há cerca de 1.000 anos. Ainda de acordo com Self (1982), este vulcão terá sido responsável pela emissão do designado "ignimbrito das Lages", o qual inclui três depósitos ignimbritos de composição traquítica-comendítica, cujas datações ¹⁴C forneceram idades de 19.600 e de 18.600 anos BP, na região de Lages e em São Mateus, respetivamente.

Dominada por um vulcanismo basáltico *s.l.* de baixa a moderada explosividade e sobretudo do tipo havaiano e estromboliano (Nunes, 2000), a Zona Basáltica Fissural está representada na zona central e na zona SE da ilha Terceira (Figura 4.3), incluindo no interior da caldeira do Vulcão dos Cinco Picos, sob a forma de inúmeras escoadas lávicas basálticas *s.l.* e depósitos de escórias. Na cordilheira central da Zona Basáltica Fissural, na região do Pico do Gaspar - Pico da Bagacina e sua vizinhança, ocorreu uma intensa atividade vulcânica nos últimos 50.000 anos (Self, 1982), incluindo no Holocénio, como é o caso das erupções do Pico Gordo, do Pico Galiarte ou do sistema fissural do Pico Gaspar (Nunes *et al.*, 2014). Integram, ainda, a Zona Basáltica Fissural os episódios vulcânicos do Algar do Carvão (1.730 a 2.115 anos BP), da Fonte do Bastardo (2.000 a 3.000 anos BP) e do vulcanismo histórico do Mistério Novo dos Biscoitos, do ano de 1761 A.D. (Nunes, 2000).

4.5 Tectónica e Sismicidade

As estruturas tectónicas dominantes na ilha Terceira apresentam orientação geral NW-SE a WNW-ESE (Nunes, 2000), as quais traduzem a influência do Rife da Terceira na tectónica local. Assume particular expressão morfológica o Graben das Lages, localizado na parte NE da ilha, de orientação geral NW-SE e limitado por escarpas de falha bem desenvolvidas, como a Falha de Santiago (a oriente) e a Falha das Fontinhas (a ocidente).

Na zona central e ocidental da ilha, são os alinhamentos vulcano-tectónicos de orientação geral WNW-ESE que dominam, acidentes tectónicos estes associados a um vulcanismo recente e que se materializam em alinhamentos de cones de escórias, domos e *coulées* bem como fissuras eruptivas. É o caso dos alinhamentos tectónicos nos flancos norte e leste do Vulcão de Santa Bárbara e do sistema fissural do Pico Gaspar (Nunes *et al.*, 2014).

Adicionalmente, estão ainda presentes na ilha Terceira acidentes tectónicos de orientação geral ENE-WSW e N-S (Figura 4.3), os primeiros mais frequentes no Vulcão do Pico Alto e os segundos na zona de Angra do Heroísmo e nos flancos do Vulcão de Santa Bárbara, por vezes como fraturas radiais deste vulcão poligenético (Nunes, 2000).

A sismicidade da ilha Terceira está condicionada pela presença do Rife da Terceira (Nunes, 1991), sendo que os sismos de maior intensidade ocorreram, maioritariamente, na metade oriental da ilha, como foi o caso dos sismos de maio de 1614 e de junho de 1841, com epicentro na zona da Praia da Vitória (Nunes, 2000).

No entanto, o sismo de 1 de janeiro de 1980, de magnitude de 7,2 e intensidade VIII/IX, foi o mais destrutivo que ocorreu na ilha desde o século XX, tendo afetado sobretudo o sector ocidental e sul da ilha Terceira, em particular a cidade de Angra do Heroísmo. Segundo Hirn *et al.* (1980) as réplicas deste sismo sugerem que o abalo principal (com epicentro no mar, entre as ilhas Terceira, São Jorge e Graciosa) levou à ativação de prolongamentos de falhas ativas conhecidas no mar na zona ul da ilha e junto a Angra do Heroísmo, tais como as falhas do Espigão e da Memória (Nunes, 2000).

4.6 Solos e vegetação

A ilha Terceira é uma ilha vulcânica, constituída maioritariamente por materiais com idades recentes, incluindo escoadas lávicas, escoadas piroclásticas e depósitos piroclásticos de queda, como cinzas, pedra-pomes e escórias basálticas. Deste modo a evolução pedológica é bastante reduzida e a diferenciação pedológica é condicionada sobretudo pela orografia e zonalidade climática. Na ilha existem vários tipos principais de solos: Solos Pardos, Andossolos Típicos, Andossolos Víttricos e Andossolos Ferruginosos (DROTRH, 2021b).

Os Solos Pardos são essencialmente constituídos por haloisite bem cristalizada e apresentam uma taxa de infiltração média, originando escoamento superficial, sendo classificados como solos do tipo C segundo a classificação hidrológica dos solos da *Soil Conservation Service* (SCS) (DROTRH, 2021b). A génese destes solos está associada à zonalidade climática, mas, o relevo, a idade e o material de origem influenciam a sua diferenciação pedológica. Este tipo de solos encontra-se em zonas baixas da ilha, mais concretamente até aos 100 m de altitude nas vertentes norte da ilha, e até aos 150 m de altitude nas vertentes sul (DROTRH, 2021b). Embora não apresentem característica ândicas os Solos Pardos são muito utilizados para a prática agrícola.

Os Andossolos Típicos são solos profundos e estratificados com, no mínimo, 40 ou 50 cm de espessura (Carvalho, 2003), caracterizados por horizontes superficiais escurecidos pela matéria orgânica e horizontes subsuperficiais pardo amarelados ou pardo avermelhados (DROTRH, 2021b). Estes tipos de solo desenvolvem-se quer a partir de formações piroclásticas de natureza traquítica, quer a partir da acumulação de *lapilli* basáltico (Carvalho, 2003) e apresentam textura predominantemente franca e granulosa, pelo que em altitude podem apresentar níveis subsuperficiais mais evoluídos que se atenuam em profundidade devido à presença de material menos alterado. Os Andossolos Típicos possuem elevada porosidade e apresentam taxa de infiltração média (DROTRH, 2021b), resultando em algum escoamento superficial e sendo classificados como solos do tipo B. Este tipo de solos encontra-se distribuído pela ilha Terceira desde o nível do mar até cerca de 500 a 600 m de altitude (DROTRH, 2021b). Até aos 150 m de altitude os Andossolos Típicos encontram-se alternados com Solos Pardos, especialmente na zona Este da ilha. Nas zonas norte e sul da ilha até aproximadamente aos 300 m de altitude predominam os Andossolos Saturados, com possíveis ocorrências pontuais de Solos Pardos, enquanto acima dos 600 m de altitude predominam os Andossolos Insaturados.

Os Andossolos Vítricos podem ser encontrados em qualquer altitude, sempre e quando o material de origem seja muito recente (DROTRH, 2021b).

Os Andossolos Ferruginosos formam-se a altitudes superiores a 500 e 600 m, em condições de elevada precipitação e menor evapotranspiração, juntamente com deficiências na drenagem, pois estas originam mudanças significativas na vegetação e promovem o processo de andossolização, em detrimento de fenómenos como a podzolização e a hidromorfia (DROTRH, 2021b). Este tipo de solo é constituído por fragmentos grosseiros de vidro vulcânico, pomítico ou basáltico e materiais orgânicos com elevado grau de decomposição soterrados (DROTRH, 2021b). Estes solos têm espessuras variáveis de 2-3 cm até 20-30 cm, apresentam baixa permeabilidade e constituem-se como barreiras horizontais à circulação da água (Carvalho, 2003). Assim, a água circula horizontalmente em zonas de contacto entre descontinuidades pedológicas, formando por vezes pequenos aquíferos suspensos nos terrenos de maior declive (Carvalho, 2003). Segundo a SCS, estes solos são classificados como solos do tipo C e apresentam uma taxa de infiltração média (DROTRH, 2021b).

Segundo DRA (2018), a ocupação dos solos na ilha Terceira é dominada pela agricultura correspondendo a 61,53% da ocupação, maioritariamente como prados ou pastagens. As “Florestas, os Meios Naturais e Seminaturais”, por seu turno, correspondem a 28,17% da área da ilha e estão concentrados essencialmente nos flancos do edifício principal e no interior das caldeiras dos vulcões do Pico Alto e de Santa Bárbara. Os “Territórios Artificializados” consistem em 6,76% e estão distribuídos pela zona costeira, concentrando-se nas cidades de Angra do Heroísmo e Praia da Vitória. As “Zonas Húmidas” representam 3,52% da área da ilha e apenas 0,02% são consideradas como massas de água.

4.7 Hidrologia e Hidrogeologia

4.7.1 Clima

O clima da ilha Terceira é influenciado pela sua latitude e posição ocidental no Grupo Central do arquipélago. De um modo geral, é possível distinguir duas estações do ano distintas: uma estação fresca, com temperaturas mais baixas e maior pluviosidade, e uma estação de verão, mais quente e que apresenta também precipitação, no entanto com menor expressão (DROTRH, 2021b).

Tendo em conta a classificação climática de Köppen, a ilha Terceira pertence ao grupo Cfb, indicando um clima chuvoso temperado, húmido em todas as estações e com temperatura média do mês mais quente não ultrapassando 22 °C (DROTRH, 2021b). Junto ao litoral, a temperatura média do ar encontra-se próxima de 17 °C, no entanto esta apresenta baixa amplitude anual, variando entre 13,2 °C de mínima, em fevereiro e 21,5 °C de máxima, em agosto (DROTRH, 2021b).

A precipitação na ilha Terceira depende, principalmente, da altitude e orientação das vertentes, apresentando uma média anual de 900 mm. No entanto estes valores variam de 1126 mm/ano junto à costa (em Angra do Heroísmo), até 3000 mm/ano em altitude, na zona NW da ilha (DROTRH, 2021b). O relevo é o fator que mais influencia este fenómeno, pois a precipitação tem essencialmente origem orográfica, fazendo com que as características climáticas da ilha variem da costa para o interior.

4.7.2 Rede hidrográfica

O escoamento superficial das bacias hidrográficas é fortemente influenciado pelas suas características pedológicas, pois estas condicionam fatores como a infiltração, o coberto vegetal, a retenção de água e o escoamento superficial (DROTRH–INAG, 2001). As formações que constituem a ilha são, de modo geral, pouco permeáveis, permitindo a ocorrência de elevada escorrência superficial (Figura 4.4), associada a uma estruturada e densa rede de drenagem (DROTRH, 2021b).

A rede de drenagem da ilha Terceira está distribuída, essencialmente, pelos quatro edifícios vulcânicos principais da ilha e apresenta uma forma radial nos flancos dos mesmos. No entanto as linhas de água têm um traçado ligeiramente irregular por apresentarem idade de formação recente, regime efêmero e características do tipo torrencial (Carvalho, 2003), estando o seu caudal associado a eventos de precipitação intensa. Os cursos de água com caudal permanente são ribeiras, estão associadas sobretudo às vertentes norte do Vulcão do Pico Alto, apresentam pequena extensão e, normalmente, secam em períodos mais prolongados de estiagem. A existência de lagoas está associada a depressões que, devido a acumulação de argilas e a formação de horizontes plácicos, as torna impermeáveis (DROTRH, 2021b).

O traçado das linhas de água, para além de condicionamento morfológico, tem, por vezes, condicionamento por falha e/ou por limites litológicos, aproveitando formações menos compactas, como zonas de fraqueza, para circular. Em zonas de micro-relevo, a drenagem superficial é quase nula e este tipo de fenómeno está normalmente associado a elevada infiltração, como é o caso da parte central da Zona Basáltica Fissural.

O Vulcão dos Cinco Picos é o que apresenta menor densidade de drenagem (DROTRH, 2021b), justificada pela elevada fracturação (tanto primária como secundária), as diferenças litológicas e o seu relevo e declive pouco acentuados. É nos flancos leste da Serra do Cume que a rede hidrográfica apresenta uma drenagem mais marcada, com um padrão radial e cursos de água encaixados nos depósitos piroclásticos que recobrem esta zona (DROTRH, 2021b). Pelo contrário, o interior da caldeira dos Cinco Picos e a região entre Porto Judeu - São Sebastião - Fonte do Bastardo - Porto Martins apresenta uma densidade de drenagem muito baixa, dada a elevada permeabilidade das formações basálticas que constituem esta região, de idade mais recente e que fazem parte integrante do sector SE da Zona Basáltica Fissural.

O Vulcão de Santa Bárbara apresenta uma rede de drenagem com um padrão radial fortemente marcado, constituindo assim a região da ilha Terceira com menor percentagem de superfície com rede hidrográfica não estruturada e com a maior densidade de drenagem (DROTRH, 2021b). Os declives assinaláveis e a elevada precipitação que caracterizam esta região explicam o carácter fortemente encaixado, em

depósitos pomíticos, dos cursos de água, (DROTRH, 2021b) separados por longos e estreitos interflúvios.

A parte central da ilha Terceira, compreendendo os vulcões de Guilherme Moniz e Pico Alto apresenta uma configuração espacial muito diversificada da rede de drenagem, condicionada pelas heterogeneidades litológicas e geomorfológicas que caracterizam a superfície destes edifícios vulcânicos (Carvalho, 2003). A rede de drenagem é mais desenvolvida em zonas de maior declive como é o caso das vertentes sul da Serra do Moirão e do flanco norte do Vulcão do Pico Alto (desde a Serra do Labaçal até ao litoral, onde está instalada uma densa rede de drenagem radial). No interior da caldeira Guilherme Moniz, onde o terreno é aplanado e constituído por depósitos piroclásticos e escoadas lávicas basálticas recentes, muito permeáveis, a drenagem superficial é inexistente ou incipiente, não obstante a presença de importantes caudais subterrâneos, como é o caso da ribeira do Cabrito (DROTRH, 2021b). É importante realçar que a ribeira da Agualva, o único curso de água com caudal permanente na ilha, desenvolve-se no flanco norte do Vulcão do Pico Alto.

Na Zona Basáltica Fissural a drenagem superficial é mais significativa no seu sector sul, entre o Pico do Gaspar-Pico da Bagacina e a linha de costa (Figura 4.4), constituída por cursos de água de curto percurso e regime efêmero.

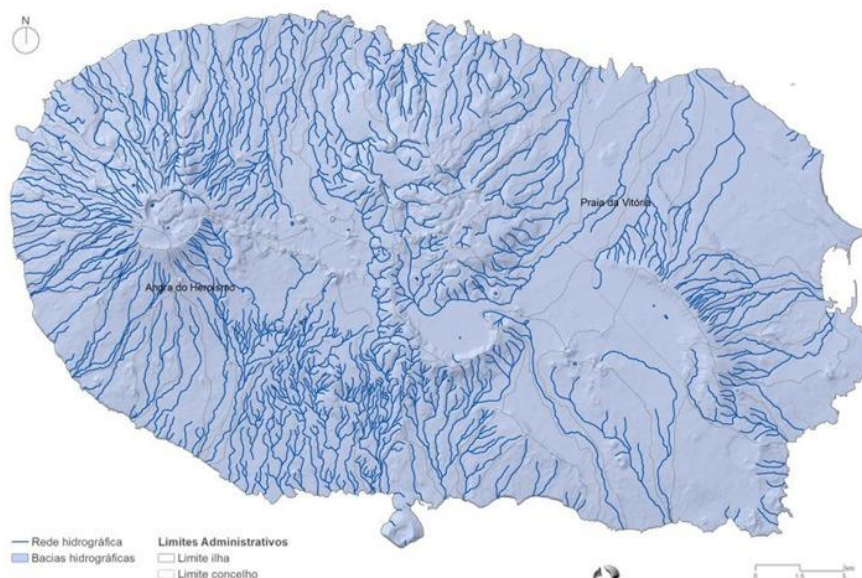


Figura 4.4 - Carta hidrográfica da ilha Terceira (adaptado de DROTRH, 2021b).

4.7.3 Hidrogeologia

A heterogeneidade da geologia da ilha Terceira e algumas das suas características, como a elevada compartimentação das massas de água, o grau de alteração e o grau de fracturação das formações geológicas, são fatores que condicionam quer a circulação da água, quer o respetivo armazenamento.

Do ponto de vista hidrogeológico a ilha Terceira apresenta dois tipos de sistemas aquíferos que são típicos de sistemas insulares vulcânicos: aquíferos suspensos e aquíferos basais. Os aquíferos suspensos encontram-se presentes em altitude, enquanto os basais se encontram ao nível do mar, recebendo recarga direta ou dos aquíferos suspensos.

O Plano Regional da Água (DROTRH–INAG, 2001) delimitou diferentes sistemas aquíferos na ilha Terceira, os quais, na sequência da transposição da Diretiva Quadro da Água 2000 (CEC, 2003), para efeitos de gestão, passaram a ter a designação de Massas de Água Subterrânea (DROTRH, 2021b; Figura 4.5).

Na ilha Terceira estão identificadas 229 nascentes distribuídas pelas várias massas de água subterrânea (DROTRH, 2021b): 66 na massa de água Pico Alto, 54 na massa de água de Santa Bárbara, 19 na massa de água Central, 28 na massa de água da Caldeira Guilherme Moniz e 62 na massa de água dos Cinco Picos. Para além das nascentes, existem 36 furos de captação de água subterrânea para consumo humano (DROTRH, 2021b): 13 na massa de água Caldeira Guilherme Moniz, 12 na massa de água dos Cinco Picos, 8 na massa de água do Pico Alto e 3 na massa de água Central (Figura 4.5).

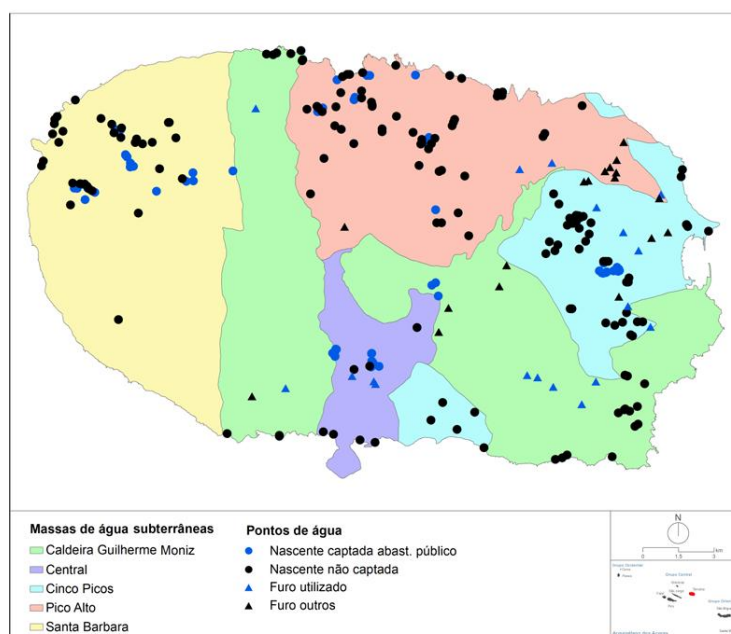


Figura 4.5 - Massas de água subterrâneas e pontos de água na ilha Terceira (DROTRH, 2021b).

A área em estudo engloba partes de duas das massas de água subterrânea definidas no Plano de Gestão da Região Hidrográfica (DROTRH, 2021b), Central e Caldeira Guilherme Moniz, as quais têm área de 24,08 km² e 135,08 km², respetivamente. Estas massas de água desenvolvem-se em sistemas aquíferos mistos, de altitude e basal, constituídos por aquíferos fraturados e porosos. A existência de aquíferos de altitude é muito condicionada pela interseção do nível freático com a superfície topográfica, mas fundamentalmente, pela variedade de formações (intercalação de escoadas e piroclastos) que refletem diferentes permeabilidades. A existência de níveis de baixa permeabilidade dificulta a progressão da água em profundidade, condicionando a sua emergência.

O sistema aquífero Central, que comporta a Massa de Água Subterrânea Central, desenvolve-se em materiais do sistema vulcânico Guilherme Moniz (DROTRH, 2021b), incluindo escoadas lávicas traquíticas e traqui-andesíticas do tipo domos e *coulées*, depósitos de ignimbritos não soldados, materiais de projeção indiferenciados e depósitos de escórias basálticas, em especial no troço superior do sistema aquífero.

O sistema aquífero suporte da Massa de Água Caldeira Guilherme Moniz é composto por materiais associados ao sistema vulcânico fissural basáltico e a materiais mais recentes associados aos vulcões

Guilherme Moniz e Cinco Picos (DROTRH, 2021b). Estão incluídas neste sistema as escoadas lávicas basálticas *s.l.* das zonas de São Mateus e da Terra Chã (emitidas maioritariamente a partir do Pico da Bagacina e cones vizinhos), depósitos de escórias basálticas *s.l.*, associados a centros eruptivos da Zona Fissural Basáltica, escoadas lávicas basálticas (por vezes escoriáceas e vacuolares) e depósitos de escórias associados a centros emissores estrombolianos implantados na área da massa de água e, ainda, materiais de projeção indiferenciados.

As massas de água subterrâneas referidas possuem composição físico-química relativamente semelhante. No entanto, a massa de água Central tem uma fácies química cloretada sódica e bicarbonatada-cloretada sódica, enquanto a massa de água Caldeira Guilherme Moniz tem águas com fácies mais variada: bicarbonatada-cloretada sódica, bicarbonatada-sulfatada sódica, bicarbonatada sódica, cloretada-bicarbonatada sódica e cloretada sódica (Cruz, 2004; *in* DROTRH, 2021b).

A taxa de recarga das massas de água da ilha Terceira está estimada entre 17,2% e 33,7%, sendo o sistema aquífero Caldeira Guilherme Moniz aquele que apresenta maior taxa de recarga, com 33,7% e o sistema aquífero Central o de menor taxa, de 17,2% (DROTRH, 2021b).

A caracterização hidráulica dos aquíferos, com base na interpretação de ensaios em furos de captação (Cruz, 2004; *in* DROTRH, 2021b) aponta para valores de transmissividade entre $2,65 \times 10^{-4}$ e $2,03 \times 10^{-1}$ m²/s, sendo os valores mais baixos encontrados nos aquíferos dos sistemas Central e Caldeira Guilherme Moniz, com valores na ordem de 10^{-3} m²/s a 10^{-4} m²/s. Os valores de condutividade hidráulica dos aquíferos que suportam estas duas massas de água são também baixos, entre 10^{-4} m/s a 10^{-5} m/s. Os valores de caudal específico dos furos que captam os aquíferos da ilha varia entre 0,17 e 166,67 L/s.m, sendo o valor mais baixo registado nas captações do sistema Caldeira Guilherme Moniz (DROTRH, 2021b).

4.8 Recursos Geotérmicos

Na ilha Terceira existem manifestações de geotermia de alta e baixa entalpia, que incluem nascentes e furos termais e o campo fumarólico das Furnas do Enxofre.

Atualmente, e conforme atrás referido, o Campo Geotérmico do Pico Alto é explorado para produção de energia elétrica (Figura 4.6) através de 3 poços de produção (PA2, PA3 e PA4) e 1 poço de reinjeção (PA8), ligados à central geotérmica de ciclo binário do Pico Alto, que produz cerca de 3 MWe, com uma capacidade instalada total de 4 MW (Nunes *et al.*, 2020, 2023).

O reservatório explorado é do tipo vapor dominante e apresenta temperaturas em profundidade entre 263 °C e 283°C. Embora, superficialmente, o Campo Geotérmico do Pico Alto se desenvolva maioritariamente no vulcão do Pico Alto e nas formações da Zona Basáltica Fissural, em profundidade o sistema geotérmico é bastante mais complexo (Figura 4.7), desenvolvendo-se em formações

geológicas dos vulcões centrais do Pico Alto, Guilherme Moniz e, potencialmente, do vulcão de Santa Bárbara (Nunes *et al.*, 2016).

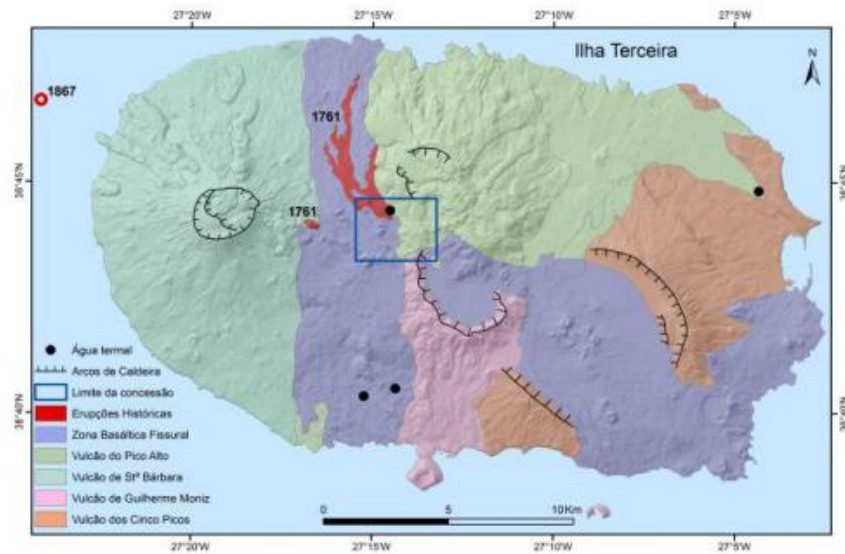


Figura 4.6 - Localização da concessão geotérmica (retângulo inserido) do Pico Alto, Ilha Terceira (DGEG, 2017).

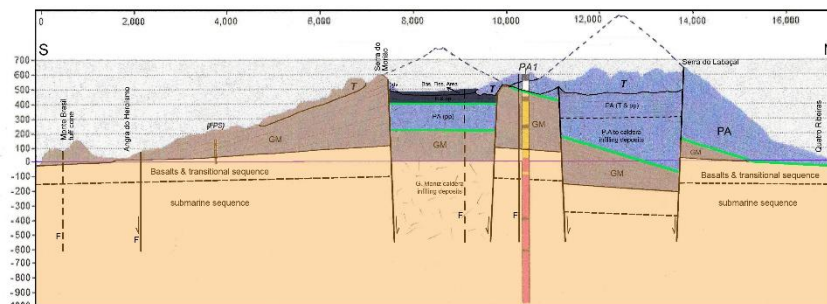


Figura 4.7 - Modelo conceptual do sistema geotérmico do Pico Alto (Nunes *et al.*, 2016).

É importante realçar que a ilha Terceira apresenta várias manifestações de geotermia de baixa entalpia, com nascentes e furos com características termais. Exemplos de manifestações tradicionalmente consideradas como águas termais são a nascente da Água Santa com 20,9 °C (projeto INOGAZ, não publicado), na zona das Quatro Ribeiras na costa Norte, e o furo do Posto Santo com 39 °C à data da execução da sondagem (Iceland Drilling, 1995) e 36,4 °C em 2008 (projeto INOGAZ, não publicado). Associado ao sistema aquífero de Angra do Heroísmo, existem evidências de geotermia de baixa entalpia, onde segundo Carvalho *et al.* (2022a) existem 3 furos (Terra Chã, Posto Santo e Farroco), com água à temperatura entre 25 e 36 °C (Figura 4.8).

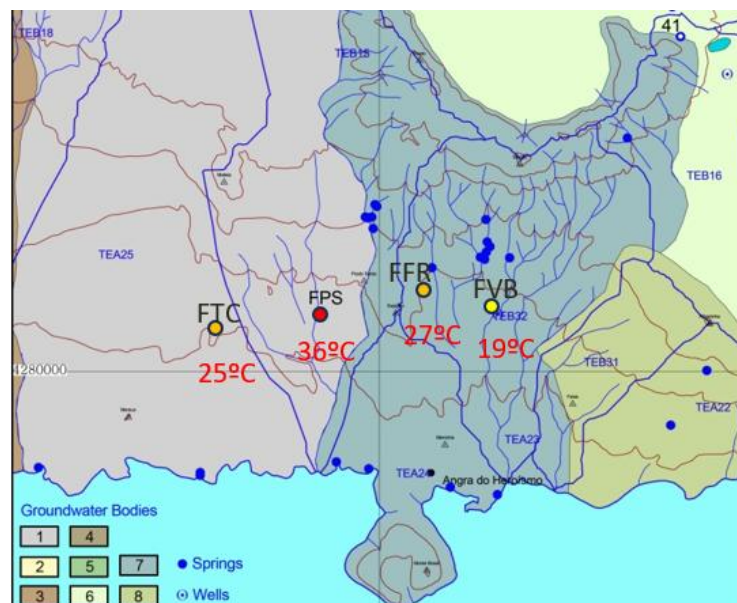


Figura 4.8 - Localização de captações por furo na área envolvente à cidade de Angra do Heroísmo e temperatura das águas captadas; Legenda: FVB - Furo da Vinha Brava, FFR - Furo do Farrouco, FPS - Furo do Posto Santo, FTC - Furo da Terra Chã (Carvalho et al., 2022b).

5. Metodologias

5.1 Metodologia geral do trabalho

O presente capítulo tem como objetivo apresentar e descrever as metodologias adotadas neste estudo.

Em termos gerais, o trabalho desenvolvido teve início com pesquisa bibliográfica abrangente das temáticas abordadas. Em seguida, e com a finalidade de recolher dados geológicos e hidrogeológicos relevantes, procedeu-se à cartografia vulcanológica detalhada da zona de estudo, bem como a trabalhos de campo de amostragem de água subterrânea, para posterior análise físico-química e isotópica em laboratório.

Em gabinete foi efetuada a interpretação dos dados de campo obtidos na cartografia geológica e a sua análise em conjunto com os resultados analíticos obtidos nas amostragens de água subterrânea. Esta análise permitiu definir um modelo conceptual do sistema aquífero.

Com base no modelo conceptual e nas temperaturas geotermométricas obtidas para o reservatório termal foi estimado o potencial energético através do método volumétrico *Heat-in-Place (HIP)* e a aplicação do Método de Monte Carlo.

5.2 Cartografia vulcanológica

Para a estimativa dos recursos hidrogeológicos ou geotérmicos é fundamental a avaliação da geometria dos aquíferos, a sua extensão e espessura, a qual deve assentar, primordialmente, em informação de natureza geológica, nomeadamente as litologias e tectónica ocorrentes. Sendo muito limitada, e nem sempre suficientemente pormenorizada, a informação sobre a geologia superficial e profunda da zona de estudo, foi necessário obter uma cartografia de superfície de detalhe (e.g. escala 1:10.000) da área de estudo. Esta permitiu uma melhor definição da geometria 3D dos aquíferos.

Neste sentido, os trabalhos de cartografia desenvolvidos no âmbito do presente estudo integraram-se em trabalhos de cartografia vulcanológica mais abrangentes em curso na Zona Basáltica Fissural da Terceira (cf. Nunes *et al.*, 2024), os quais complementam os anteriores trabalhos de Nunes *et al.* (2014) e Nunes (2017) e têm por base a seguinte metodologia:

- i) Compilação de trabalhos de cartografia geológica realizados sobre a área de estudo;
- ii) Fotointerpretação preliminar da área, a partir de cobertura de fotografia aérea na escala 1:40.000 da *USN - United States Navy*, datada de Agosto de 1954, e de fotografia aérea, a cores, na escala 1:18.000 da Região Autónoma dos Açores, datada de Outubro de 2004. Com esta observação de fotografia aérea em estereoscopia pretende-se distinguir relevos que facilitem a identificação de estruturas vulcânicas, como cones, crateras, *coulées*, domos e outras escoadas lávicas, bem como identificar potenciais zonas de contacto entre diferentes unidades ou formações geológicas;
- iii) Trabalhos de cartografia vulcanológica de detalhe no terreno (ao nível do afloramento), utilizando a fotografia aérea vertical 1:18.000 da zona em estudo, onde se procede à implantação direta de todos os elementos recolhidos no campo e à sua fotointerpretação. Estes trabalhos incluem a definição de unidades/subunidades vulcanológicas e a identificação e caracterização de formações geológicas/episódios eruptivos ocorrentes na zona, bem como a determinação/estimativa da

espessura das formações geológicas, o registo das relações estratigráficas observadas *in situ*, a cartografia dos acidentes tectónicos existentes (ou inferidos no âmbito da etapa anterior), a amostragem de rochas (para análise geoquímica total) e, quando possível, a recolha de matéria orgânica, para a realização de datações isotópicas por ^{14}C ;

iv) Trabalhos de gabinete, incluindo a análise da informação recolhida no campo, sua interpretação e elaboração de esboços cartográficos e de perfis geológicos interpretativos, visando a elaboração da carta vulcanoestratigráfica final, na escala 1:10.000 (Nunes, 2017).

Dada a natureza basáltica *s.l.* predominante da zona de estudo, dominada pela presença de diversas escoadas lávicas e depósitos/cones de escórias, nos trabalhos de campo adotou-se o critério mineralógico utilizado por Nunes (1999) para a cartografia diferenciada das diferentes escoadas lávicas, que correspondem a diferentes formações geológicas e retratam diferentes episódios eruptivos ocorrentes na zona de estudo. Este critério consiste na análise macroscópica das rochas, complementada por uma observação com uma lupa de campo e o seu agrupamento em diferentes tipos litológicos de acordo com a composição modal, a textura da rocha e a morfologia dos fenocristais presentes em amostra de mão. Ou seja, para cada afloramento, identificaram-se os principais fenocristais presentes (usualmente olivina, piroxena e plagioclase), as suas dimensões e hábito, proporções relativas entre si e, ainda, a percentagem de fenocristais relativamente à pasta, de que resultaram as diferentes tipologias litológicas cartografadas (ver capítulo 6).

Na cartografia realizada, para além do critério mineralógico acima exposto, foram igualmente tidos em conta outros aspetos fundamentais (Nunes, 1999), como o modo de jazida dos produtos vulcânicos, o estado erosivo dos cones, a morfologia das escoadas lávicas (*pahoehoe* versus *aa*), o sentido de fluência das escoadas, a presença ou ausência de solos e a sua espessura, o estado de conservação ou alteração das formações geológicas e, ainda, a observação, *in situ*, das relações estratigráficas entre diferentes formações e produtos vulcânicos, permitindo a definição de colunas vulcanoestratigráficas para diferentes sectores da área cartografada.

Em novembro de 2023 e fevereiro de 2024 decorreram trabalhos de campo na ilha Terceira no âmbito do presente trabalho e relacionados com a cartografia vulcanológica do Sistema Basáltico Fissural da ilha Terceira.

5.3 Hidrogeologia

5.3.1 Estimativa da Infiltração de Aquíferos

São numerosos os métodos existentes para o cálculo da infiltração e recarga de aquíferos. Os métodos mais recentes recorrem a ferramentas de informação geográfica (SIG), que utilizam um sistema de sobreposição ponderada de parâmetros e variáveis físicos e geográficos.

Os parâmetros e variáveis com maior importância no cálculo da infiltração e recarga de aquíferos são: precipitação, declive, litologia, tipo de solo, vegetação e ocupação do solo. No entanto, alguns destes parâmetros têm maior relevância e, consequentemente, maior peso do que outros.

Na área em estudo, fundamentalmente rural e onde existem maioritariamente pastagens, os parâmetros solo e vegetação são muito homogêneos, não tendo sido utilizados no cálculo da infiltração. O solo encontra-se muito pouco evoluído/decomposto e as propriedades permeabilidade e porosidade, que

condicionam fortemente a infiltração, têm um comportamento semelhante ao da litologia (algumas das litologias podem mesmo apresentar comportamento de solo).

Com o recurso ao *software* ArcGis Pro, foi efetuada a estimativa da infiltração e eventual recarga de aquíferos, tendo por base o método do Índice de Recarga Efetiva (*IRef*) (CCDRLVT, 2015), representado pela equação (5.1), adaptado à tipologia de área em estudo.

$$IRef = (1.IP + 1.D + 3.ZV)/5 \quad (5.1)$$

Onde, *IP* corresponde à infiltração potencial, *D* ao declive da superfície topográfica e *ZV* à litologia.

A adaptação do *IRef* (equação (5.1)) consistiu em eliminar o parâmetro da recarga potencial, utilizando apenas a soma ponderada dos valores de declive e de litologia (equação (5.2)). As classes aplicadas e respetivos índices de declive e litologias estão representadas na Tabela A.1 e Tabela A. 2 (em anexo), respetivamente.

O índice assim obtido foi utilizado para estimar a infiltração, servindo de fator de ponderação para precipitação da área em estudo.

$$IRef_{adp} = (1.D + 3.ZV)/4 \quad (5.2)$$

5.3.2 Amostragem de Águas Subterrâneas e Métodos Analíticos

Com o objetivo de se caracterizar o sistema aquífero de Angra do Heroísmo, foi recolhida informação de inventários de pontos de água em Planos de Gestão de Região Hidrográfica, dissertações, entidades abastecedoras de água e relatórios. Foram selecionados os pontos de água com maior importância para os objetivos do estudo, onde se procedeu à recolha de amostras de água e realização de análises físico-químicas e isotópicas.

A recolha de amostra de água subterrânea foi realizada em nascentes e furos, explorados pela Câmara Municipal de Angra do Heroísmo para abastecimento público, em duas campanhas, de 21 a 29 de novembro de 2023 e a 2 de maio de 2024. Muitos pontos de água referidos na bibliografia não estão atualmente acessíveis. Para se aumentar a informação hidrogeológica, foram recolhidos e dados bibliográficos apresentados nos seguintes trabalhos: DROTRH-INAG (2001), Rodrigues (2002), Carvalho (2003), Freire (2013), DROTRH (2015), DROTRH (2021b) e Projeto INOGAZ (dados não publicados). A localização dos pontos de água utilizados neste estudo está representada na Figura 5.1 e as suas características na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Características dos pontos de água utilizados neste estudo.

Designação	Referência	Tipo	Cota (m)	Coordenadas UTM	
				M	P
Fonte da Telha 1	FT1	Nascente	340	480065	4282177
Fonte da Telha 3 ¹	FT3	Nascente	300	479908	4282020
Fonte da Telha 4 ¹	FT4	Nascente	320	479959	4282006
Nasce Água 1	NA1	Nascente	250	481560	4281682
Nasce Água 2 ¹	NA2	Nascente	250	481611	4281603
Nasce Água 3 ¹	NA3	Nascente	240	481563	4281523
Negrito ³	NG	Nascente	0	475468	4278612
Bravio ³	BR	Nascente	0	477665	4278504
Silveira ³	SIL	Nascente	0	479498	4278711
Nascente da Lapinha	NL	Nascente	200	480845	4281272
Terra Chã	TC	Furo	109	477922	4280533
Vinha Brava	VB	Furo	168	481717	4280709
Farrouco	FR	Furo	180	480726	4281044
Posto Santo	PS	Furo	156	479285	4280721
Furo de S.Mateus	SM	Furo	103	476508	4280198

1- DROTRH-INAG (2001); 2- Freire (2013).

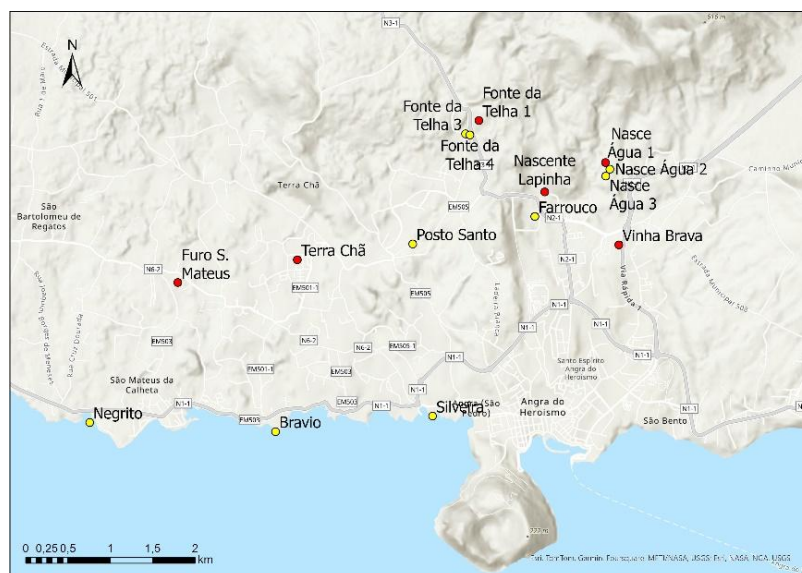


Figura 5.1 - Localização de pontos de água utilizados neste estudo: a vermelho, locais onde foi efetuada amostragem no âmbito deste trabalho; a amarelo, locais com dados bibliográficos.

Durante a amostragem de águas foram identificadas várias captações por furo (Terra Chã, Posto Santo, Farrouco) cuja água apresentava características termiais, várias nascentes em altitude (Fonte da Telha 1, Fonte da Telha 3, Fonte da Telha 4, Nasce Água 1, Nasce Água 2, Nasce Água 3, Nascente da Lapinha) e nascentes ao nível do mar (Negrito, Bravio, Silveira).

No momento da amostragem foram medidos parâmetros físico-químicos *in situ*: temperatura, pH, condutividade elétrica e potencial redox.

A recolha das amostras de águas seguiu o seguinte procedimento:

- Recolha de 250 mL de água para a determinação de CO₂ total onde foi adicionado 1 mL de base (NaOH-10M), para se obter pH de aproximadamente 8,3 e impedir a libertação do gás;

- Recolha de 100 mL de água para a determinação de catiões e metais; a amostra foi filtrada *in situ*, com filtro de 45 µm poro e adicionadas 2 gotas de ácido nítrico ultrapuro, para acidificar a amostra até pH inferior a 3, evitando a precipitação de alguns elementos;
- Recolha de 250 mL de água, sem ar e qualquer tipo de preparação, para a determinação da alcalinidade;
- Recolha de 100 mL de água, sem preparação, para a determinação de aniões;
- Recolha de 100 mL de água, sem bolhas de ar e sem preparação, para a determinação de isótopos estáveis $\delta^{18}O$ e δ^2H .

A determinação de CO_2 livre, CO_2 total e alcalinidade foi realizada por titulação ácido-base no INOVA - Instituto de Inovação Tecnológica dos Açores. Os aniões foram analisados por cromatografia iónica no *Actlabs Laboratories*, no Canadá. A determinação de catiões e metais foi também efetuada no mesmo laboratório, por ICP-MS, HR-ICP-MS e ICP-OES, dependendo do grau de mineralização da amostra. Informação sobre os limites de deteção dos métodos analíticos podem ser consultados em <https://actlabs.com/>.

Para a determinação dos isótopos estáveis $\delta^{18}O$ e δ^2H , as amostras foram enviadas para o Laboratório C²TN do Instituto Superior Técnico (IST), onde foram utilizados os métodos propostos por Friedman (1953) e Epstein e Mayeda (1953), e o padrão internacional V-SMOW (*Vienna – Standard Mean Ocean Water*), sendo os resultados apresentados em permilagem (‰) e notação δ , através da seguinte equação:

$$\delta\text{‰} = 1000 \cdot (R_a - R_p) / R_p \quad (5.3)$$

Onde, R_a representa a razão isotópica entre os isótopos pesados e leves na amostra e R_p representa a razão isotópica entre os isótopos pesados e leves no padrão.

5.3.3 Tratamento de dados químicos e isotópicos

Para o tratamento e interpretação das análises físico-químicas (das amostras recolhidas no campo e das compiladas na bibliografia) foram utilizados diversos *softwares*, tais como o Microsoft Office Excel, o ArcGis Pro e o PHREEQCI.

O *software* Microsoft Office Excel foi utilizado para o tratamento e representação dos dados, nomeadamente para a elaboração de gráficos, tabelas e diagramas. O *software* ArcGIS Pro permitiu efetuar a georreferenciação dos pontos de água, elaborar mapas e perfis topográficos.

O PHREEQCI (Parkhurst & Appelo, 1999) foi utilizado para o cálculo da especiação das espécies dissolvidas e dos equilíbrios termodinâmicos das águas em relação a diversas fases sólidas, através do Índice de Saturação.

O equilíbrio termodinâmico de uma reação de dissolução/precipitação (K), de uma fase sólida ou gasosa (dissolução/exsolução), $BbDd$, é representada pela seguinte equação (5.4), assumindo que por dissolução a fase sólida origina b iões B^+ e d iões D^- :

$$K = ((a_{B^+})^b \cdot (a_{D^-})^d) / a_{BbDd} \quad (5.4)$$

Onde, a_{BbDd} representa a atividade do sólido ou gás, a_{B^+} e a_{D^-} representam as atividades dos iões da dissolução e K a constante de equilíbrio termodinâmico da reação.

Como a atividade de sólidos (que não são solução sólida) é igual a 1, a expressão da constante de equilíbrio reduz-se ao chamado “produto de solubilidade”:

$$K = (a_{B+})^b \cdot (a_{D-})^d \quad (5.5)$$

O produto das atividades das espécies dissolvidas na água é representado pelo quociente de reação (Q). Este permite, em determinado instante da reação, conhecer o estado de saturação da fase sólida ou gasosa. Desta forma, o índice de saturação (IS) de qualquer fase sólida é dado pela relação entre o quociente de reação (Q) e a constante de equilíbrio (K) (equação 5.6):

$$IS = \text{Log} \left(\frac{Q}{K} \right) \quad (5.6)$$

Quando $IS=0$ significa que a água está em equilíbrio com a fase sólida; quando $IS>0$ a solução encontra-se sobressaturada, ou seja, pode precipitar a fase mineral; quando $IS < 0$ a solução está subsaturada, *i.e.*, apresenta tendência para dissolver a fase mineral. Ao cálculo de IS estão associadas imprecisões analíticas e termodinâmicas, sendo necessário estabelecer um intervalo de variação. Langmuir (1968 *in* Carvalho, 1999) propôs o intervalo $[-0,1$ e $0,1]$ para o equilíbrio com a calcite, podendo este intervalo ser utilizado para todos os outros minerais (Carvalho, 1999). Assim, $\text{Log } IS > 0,1$ indica que a solução se encontra sobressaturada e se $\text{Log } IS < -0,1$ a solução está subsaturada.

A realização de estudos de sistemas hidrogeológico e geotérmicos recorrendo a isótopos ambientais estáveis são uma mais-valia na definição da origem da água e da área de recarga dos aquíferos, nomeadamente com o recurso às razões isotópicas δ^2H e $\delta^{18}O$.

A composição isotópica média anual das águas meteóricas apresenta variações em função da altitude, da latitude e distância ao mar, devido ao processo de fracionamento isotópico. O fracionamento isotópico é um fenómeno que ocorre devido a processos como a difusão, evaporação, condensação e ebulição. Quanto maior a latitude, a altitude e a distância ao mar mais empobrecida é a composição isotópica da água de precipitação. Através da composição isotópica do fluido em análise (sendo maioritariamente água) é possível inferir a zona de alimentação de aquíferos, nomeadamente em locais montanhosos. A análise permite também detetar relações entre diferentes aquíferos, entre águas superficiais e águas subterrâneas, ou até mesmo a ocorrência de fenómenos que sejam responsáveis pelo fracionamento.

Craig (1961) definiu a relação isotópica entre $\delta^{18}O$ e δ^2H presentes na água de precipitação do globo, através da seguinte equação (5.7), que define a Reta das Águas Meteóricas Globais (*Global Meteoric Water Line*, GMWL), a reta das águas meteóricas a nível mundial:

$$\delta^2H = 8\delta^{18}O + B \quad (5.7)$$

Onde, B é constante e tem o valor de 10. Todavia, o valor de B está associado à variação da humidade relativa das massas de ar oceânicas, o que pode originar desvios à GMWL (Merlivat & Jouzel, 1979 *in* Nuti, 1991). No Arquipélago dos Açores, B assume o valor 15 de acordo com Carvalho (1999). Por sua vez, Rodrigues (2002) propôs outra relação isotópica, para a Reta Meteórica dos Açores, tendo por base a precipitação de Angra do Heroísmo, Ponta Delgada e Fajã de Cima (equação (5.8)):

$$\delta^2H = 7,75 (0,63) \delta^{18}O + 8,86 (2,42) \quad (5.8)$$

Esta relação pode ser considerada representativa da precipitação que ocorre no arquipélago dos Açores, em zonas litorais até 200 m de altitude (Rodrigues, 2002), estando próxima da GMWL proposta por Craig (1961).

A interpretação dos resultados dos isótopos estáveis $\delta^{18}O$ e δ^2H das águas estudadas foi realizada através da comparação com a GMWL de Craig (1961) e com as retas das águas meteóricas regionais dos Açores proposta por Carvalho (1999) e Rodrigues (2002).

5.3.4 Estimativa da Temperatura da Água no Reservatório

A geotermometria química apresenta várias aplicações, sendo a principal a estimativa de temperatura de um reservatório geotérmico. Uma abordagem comum para estimar essa temperatura é baseada na concentração de espécies dissolvidas numa água.

Os geotermómetros aquosos respeitam dois princípios básicos: 1) a solubilidade de minerais individuais e 2) as reações de dissociação estão dependentes da temperatura (Fournier, 1991). Este método geoquímico assume ainda que existe um equilíbrio químico em profundidade e que não ocorrem reações de precipitação e/ou dissolução durante a ascensão do fluido para a superfície (Carvalho, 1999).

O uso de geotermómetros aquosos envolve o cálculo de temperaturas individuais e quando existem significativas discrepâncias, estas estão usualmente relacionadas com mistura de água fria, reações químicas ocorridas na zona de ascensão, ausência de equilíbrio no reservatório, ou ao facto de algumas das aproximações não serem aplicáveis, apesar do equilíbrio água/mineral atingido no reservatório. (Carvalho, 1999).

Para o cálculo da temperatura do sistema aquífero termal de Angra do Heroísmo foram utilizados os geotermómetros aquosos com base nas espécies dissolvidas de SiO_2 , Na/K, Na-K-Ca, K-Mg e Na/Li.

Os geotermómetros de sílica permitem calcular a temperatura de reservatório recorrendo à várias equações (equações 5.9 a 5.14) presentes na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Equações dos geotermómetros de sílica.

Geotermómetros	Equação		Autor
Quartzo sem perda de vapor (S=0)	$T(^{\circ}C) = 1309/(5,19 - \log SiO_2) - 273,15$	(5.9)	Fournier (1973 e 1977 in Fournier, 1991)
Quartzo com perda máxima de vapor a 100 °C (H=0)	$T(^{\circ}C) = 1522/(5,75 - \log SiO_2) - 273,15$	(5.10)	
Calcedónia	$T(^{\circ}C) = 1032/(4,69 - \log SiO_2) - 273,15$	(5.11)	
α -Cristobalite	$T(^{\circ}C) = 1000/(4,78 - \log SiO_2) - 273,15$	(5.12)	
Opala-CT (β -Cristobalite)	$T(^{\circ}C) = 781/(4,51 - \log SiO_2) - 273,15$	(5.13)	
Sílica Amorfa	$T(^{\circ}C) = 731/(4,52 - \log SiO_2) - 273,15$	(5.14)	

Os geotermômetros com base na razão dos cátions Na/K são muito utilizados no cálculo de temperaturas de reservatórios com elevada temperatura e tempo de permanência da água (Carvalho, 1999). Kharaka & Mariner (1989) recomenda o uso deste geotermômetro apenas quando o sistema apresenta temperaturas superiores a 150 °C. Na Tabela 5.3 estão representadas as equações (5.15 a 5.21) propostas por vários autores para o cálculo da temperatura de reservatório com base na concentração dos íons Na e K.

Tabela 5.3 - Equações dos geotermômetros de Na/K.

Geotermômetros	Equação		Autor
Na/K	$T(^{\circ}\text{C}) = 856 / (0,857 + (\log (Na/K)) - 273,15$	(5.15)	(Truesdell, 1976)
	$T(^{\circ}\text{C}) = 833 / (0,78 + (\log (Na/K)) - 273,15$	(5.16)	(Tornani, 1980)
	$T(^{\circ}\text{C}) = 933 / (0,993 + (\log (Na/K)) - 273,15$ (25 – 250°C)	(5.17)	(Arnósson, 1983)
	$T(^{\circ}\text{C}) = 1319 / (1,699 + (\log (Na/K)) - 273,15$ (250 – 300°C)	(5.18)	(Arnósson, 1983)
	$T(^{\circ}\text{C}) = 1217 / (1,483 + (\log (Na/K)) - 273,15$	(5.19)	(Fournier, 1983)
	$T(^{\circ}\text{C}) = 1178 / (1,47 + (\log (Na/K)) - 273,15$	(5.20)	(Nieva & Nieva, 1987)
	$T(^{\circ}\text{C}) = 1390 / (1,75 + (\log (Na/K)) - 273,15$	(5.21)	(Giggenbach <i>et al.</i> , 1983)

A aplicabilidade do geotermômetro Na-K-Ca está fortemente dependente da temperatura e da pressão parcial de CO₂ (PCO₂). Segundo Carvalho (1999), este geotermômetro apenas apresenta boas estimativas de temperatura de reservatório em águas com temperaturas superiores a 200 °C. No entanto, a concentração de Mg na solução pode afetar fortemente as estimativas. De acordo com Fournier & Potter (1979) a elevada concentração de Mg tem tendência a decrescer com o aumento da temperatura e reage com a rocha envolvente a temperaturas relativamente baixas pois oferece resultados demasiado elevados. Resultando assim em valores de temperatura em profundidade estimados, relativamente baixos.

Na equação (5.22) β assume o valor de 4/3 para temperaturas inferiores a 100°C e de 1/3 para temperaturas superiores (Tabela 5.4).

O cálculo de geotermômetros utilizando a relação K^2/Mg é derivada a partir da equação de feldspato-K, clinocloro e moscovite. Na Tabela 5.5 estão representadas as equações (5.25 a 5.27) propostas por alguns autores.

Tabela 5.4 - Equações dos geotermômetros de Na-K-Ca.

Geotermômetros	Equações		Autor
Na-K-Ca	$T(^{\circ}C) = 1647/(\log(Na/K) + \beta(\log(\sqrt{Ca}/Na) + 2,06) + 2,47) - 273,17$	(5.22)	(Fournier & Truesdell, 1973)
	$T(^{\circ}C) = 1096,7/(3,08 - \log(Na/\sqrt{Ca})) - 273,15$	(5.23)	Tonani (1980 in Fournier, 1991)
	$T(^{\circ}C) = 1930/(3,861 - \log(K/\sqrt{Ca})) - 273,15$	(5.24)	

Tabela 5.5 - Equações dos geotermômetros de K/Mg.

Geotermômetros	Equações		Autor
K-Mg	$\log(K^2/Mg) = 14 - (4410/T)$	(5.25)	(Giggenbach <i>et al.</i> , 1983)
	$T(^{\circ}C) = \frac{2330}{7,35 - \log\left(\frac{K^2}{Mg}\right)} - 273,15$ ($\log(K^2/Mg) > 1,25$)	(5.26)	(Fournier, 1991)
	$T(^{\circ}C) = \frac{1077}{4,033 + \log\left(\frac{K^2}{Mg}\right)} - 273,15$ ($\log(K^2/Mg) < 1,25$)	(5.27)	

O geotermômetro Na/Li baseia-se na teoria proposta por Michard (1988), de que a temperatura de reservatório é condicionada pela relação adequada entre elementos vestigiais e elementos maiores. Na Tabela 5.6 estão representadas as equações (5.28 a 5.30) propostas por alguns autores para este geotermômetro e utilizadas neste trabalho.

Tabela 5.6 - Equações dos geotermômetros de Na-Li.

Geotermômetros	Equações		Autor
Na-Li	$T(^{\circ}\text{C}) = 1590/(0,779 - \log(\text{Na}/\text{Li})) - 273,15$	(5.28)	(Kharaka & Mariner, 1989)
	$T(^{\circ}\text{C}) = 1000/(0,389 - \log(\text{Na}/\text{Li})) - 273,15$ (Cl < 0,3M)	(5.29)	(Fouillac & Michard, 1981)
	$T(^{\circ}\text{C}) = 1195/(0,130 - \log(\text{Na}/\text{Li})) - 273,15$ (Cl > 0,3M)	(5.30)	

5.4 Estimativa do potencial energético

Para o cálculo do potencial energético da área em estudo utilizou-se o *software* 3DHIP-Calculator, Versão 1.2 (Piris *et al.*, 2022). Este *software* permite estimar o potencial energético de um reservatório geotérmico através do método volumétrico *Heat-in-Place* (HIP) (Muffler & Cataldi, 1978, Garg & Combs, 2015 in Piris *et al.*, 2022), com base em modelos geológicos e térmicos 3D.

O método *HIP* envolve o cálculo da energia térmica contida em cada volume de rocha e água e, em seguida, a estimativa da quantidade dessa energia que pode ser recuperada (*Hrec*), em função da Central Geotérmica associada à exploração do recurso. Este método, implementado pelos USGS (*United States Geological Services*), tem em consideração propriedades petrofísicas, propriedades do fluido, volume do reservatório, temperaturas do reservatório e temperatura do fluido de rejeição/reinjeção, e é considerado como o mais adequado para muitos reservatórios de baixa temperatura (Muffler & Cataldi, 1978 in Piris *et al.*, 2021).

O cálculo do potencial energético do reservatório, pelo método volumétrico, é obtido através da equação (5.11) (*HIP*, Muffler & Cataldi, 1978 in Piris *et al.*, 2021). Esta equação pode ser resolvida de forma determinística, mas também utilizando uma abordagem probabilística combinada com simulações de Monte Carlo (Shah *et al.*, 2018 in Piris *et al.*, 2021, 2022).

$$HIP = V \cdot [\Phi \cdot \rho_F \cdot C_F + (1 - \Phi) \cdot \rho_R \cdot C_R] \cdot (T_r - T_i) \quad (5.31)$$

Onde:

V = Volume do reservatório (m^3)

ρ_r = Densidade da rocha à temperatura do reservatório (kg/m^3)

ρ_F = Densidade do fluido à temperatura do reservatório (kg/m^3)

C_R = Calor específico da rocha nas condições de temperatura do reservatório ($\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{K}$)

C_F = Calor específico do fluido nas condições de temperatura do reservatório ($\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{K}$)

Φ = Porosidade

T_r = Temperatura média do reservatório ($^{\circ}\text{C}$)

T_i = Temperatura final de rejeição/reinjeção ($^{\circ}\text{C}$)

A energia recuperável do reservatório geotérmico de baixa temperatura, no caso de uma aplicação direta de calor, pode ser calculada através da equação (5.31) (*Hrec*, Arkan & Parlaktuna, 2005, Trumpy *et al.*, 2016 e Limberger *et al.*, 2018, in Piris *et al.*, 2022).

$$H_{rec} = \frac{(HIP \cdot C_e \cdot R)}{T_{live} \cdot P_f} \quad (5.32)$$

Onde:

Hrec = Potencial de Energia recuperável (MW_e)

R = Fator de recuperação

C_e = Coeficiente de eficiência de conversão elétrica

P_f = Fator da Central geotérmica

T_{live} = Tempo de vida médio da Central (em segundos)

O Método de Monte Carlo é um método estocástico que a permite estimar resultados de um evento incerto, através da simulação de diferentes cenários a partir da geração de sequências de números aleatórios (Veiga, 2008). Nas primeiras fases dos projetos geotérmicos, quando o recurso é preliminarmente estimado e mapeado, as variáveis da equação do método volumétrico apresentam incerteza e a aplicação do Método de Monte Carlo permite aumentar a dimensão das variáveis (por amostragem aleatória), reduzindo a incerteza na avaliação dos recursos geotérmicos.

Na avaliação dos recursos geotérmicos do aquífero termal de Angra foi definida a incerteza das variáveis de entrada e atribuído o modelo probabilístico de distribuição normal (PDF). Foram criados ficheiros de dados de entrada, modelo geológico (geometria do reservatório e litologia) e modelo térmico (temperaturas de reservatório, propriedades do fluido termal, propriedades da rocha) em 3D, discretizados numa malha quadrada de 500 m de lado com uma área de 4 x 6,5 km (26 km²) (Figura 5.2).

O programa calcula o *HIP* e o Calor Recuperável (*Hrec*) para a litologia/formação geológica e intervalo de profundidade desejados. Os resultados são apresentados em mapas *raster* 2D e diagramas XY (histogramas e gráficos de frequência acumulada).

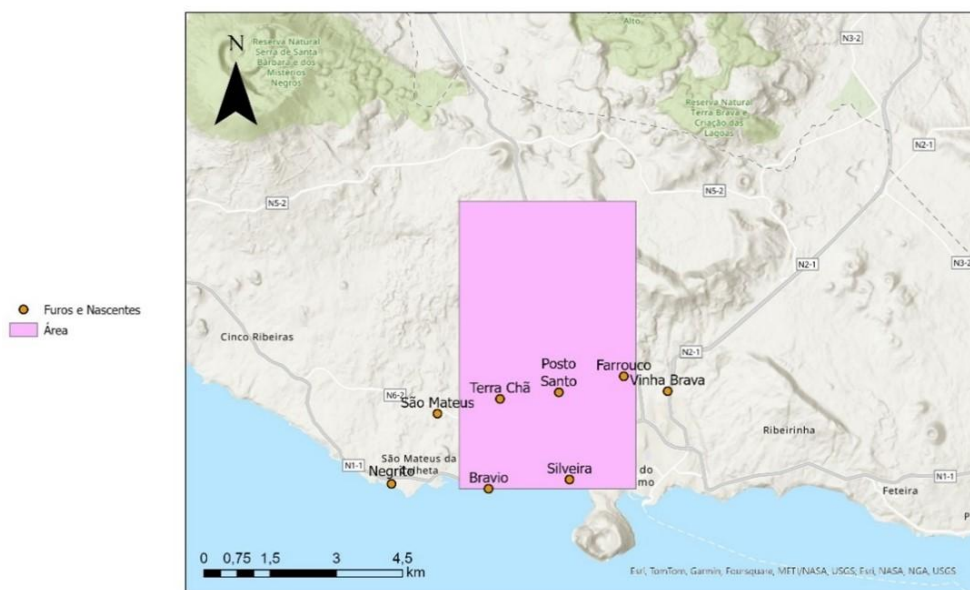


Figura 5.2 - Representação da área modelada para o cálculo do potencial energético.

6. Cartografia Vulcanológica da Área de Estudo

De acordo com Nunes *et al.* (2014) e Nunes (2017), o Sistema Basáltico Fissural estende-se, na parte central da ilha Terceira, segundo uma faixa norte-sul, com cerca de 5 km de largura, desde a Ponta dos Biscoitos, na costa norte, até à Baía do Fanal-Negrilo, na costa sul da ilha Terceira. Na sua zona axial, a maior cota, está localizada a maior parte dos centros eruptivos responsáveis pela emissão das escoadas lávicas e piroclastos basálticos (e.g. escórias) que compõem as formações geológicas do Sistema Basáltico Fissural. De entre estes centros eruptivos destaca-se o Pico do Gaspar e sistema fissural associado, o Pico da Bagacina e os cones de escórias da Criação do Filipe e do Galiarte, os quais definem importantes alinhamentos vulcanotectónicos de orientação geral WNW-ESE.

Para norte dessa zona axial predominam as escoadas lávicas emitidas do “Sistema Fissural do Pico do Gaspar”, bem como aquelas emitidas do Pico Gordo (que formam o promontório da Ponta dos Biscoitos) e as do Pico Galiarte (ou “Pico dos Pedreiros”), onde se desenvolve o sistema cavernícola Malha-Balcões-Chamusca (Nunes *et al.*, 2014). Enquanto que as primeiras apresentam fluxo quer para norte, quer para sul da zona axial, as escoadas lávicas do Pico Gordo e do Pico Galiarte movimentaram-se apenas para norte, tal como as escoadas da erupção histórica de 1761 A.D., do Mistério dos Biscoitos.

Ao invés, na área de estudo do presente trabalho, implantada para sul da zona axial atrás referida, predominam as escoadas lávicas emitidas do Pico da Bagacina, da Criação do Filipe/Achadas e do Biscoito da Atalhada/”cone 536”, com fluxo apenas para sul (Figura 6.1), as quais integram-se na unidade vulcanoestratigráfica correspondente ao período pós Ignimbrito Lajes-Angra (de idade inferior a 23.000 anos *BP*) e que foi designada por Self (1976) como *Upper Terceira Group (UTG)*.

De acordo com Nunes *et al.* (2024), tendo por base relações estratigráficas e morfológicas inferidas no terreno e por fotointerpretação, e ainda as datações radiométricas disponíveis, o *UTG* foi subdividido em 3 sub-unidades:

- Sub-unidade superior (I), de idade inferior a 5.000 anos, onde se incluem as formações geológicas do Biscoito da Atalhada/”cone 536”, as mais recentes da área de estudo (cf. I – Figura 6.1);
- Sub-unidade intermédia (II), de idade compreendida entre 5.000 e 10.000 anos, onde se incluem os dois episódios eruptivos associados ao Pico da Bagacina (cf. II – Figura 6.1);
- Sub-unidade inferior (III), de idade superior a 10.000 anos e posterior à formação do Ignimbrito das Lajes, onde se incluem os episódios eruptivos do Pico do Gaspar e sistema fissural associado (cf. III – Figura 6.1).

A cartografia realizada mostra a presença de diversas *kipukas* (“ilhas”) no seio das escoadas lávicas basálticas *s.l.* atrás referidas, constituídas por relevos proeminentes associados a domos e/ou *coulées* traquíticas *s.l.* do Vulcão Guilherme Moniz, como é o caso da Matela ou, mais a sudeste, da Penha de Franca-Pico da Urze (Figura 6.1). Adicionalmente, o designado “Ignimbrito das Lajes”, datado de 18.600 anos *BP* (Self, 1976), aflora quer na Ponta de São Mateus, quer a montante da Matela (Figura 6.1), no primeiro caso como um ignimbrito soldado e com *fiamme* de dimensão decimétrica. Estas *kipukas* põem em evidência a relativa pequena espessura do empilhamento lávico associado à Zona Basáltica Fissural e, logo, a sua incapacidade em obliterar totalmente as formações de natureza siliciosa e mais antigas, quer do Vulcão do Pico Alto, quer do Vulcão Guilherme Moniz. Confirma-se, assim, o indicado por Nunes *et al.* (2014), de que a Zona Fissural Basáltica corresponde a uma “fina película” superficial, com espessura da ordem de 50 a 100 metros, como está expresso no furo termométrico TG-B e no poço geotérmico PA8 (ver também capítulo 8 do presente trabalho).

Na parte oeste da zona cartografada (nomeadamente na zona de São Bartolomeu e da ribeira da Ponte) são as escoadas lávicas basálticas associadas ao Vulcão de Santa Bárbara que afloram (Figura 6.1), sob a forma

de um extenso campo de lavas *pahoehoe*, frequentemente com uma textura característica, de lavas muito porfíricas e com abundantes fenocristais aciculares de plagioclase (por vezes com 5-10 mm comprimento), tal como foi observado na costa norte, a oeste do Porto dos Biscoitos (Nunes *et al.*, 2014).

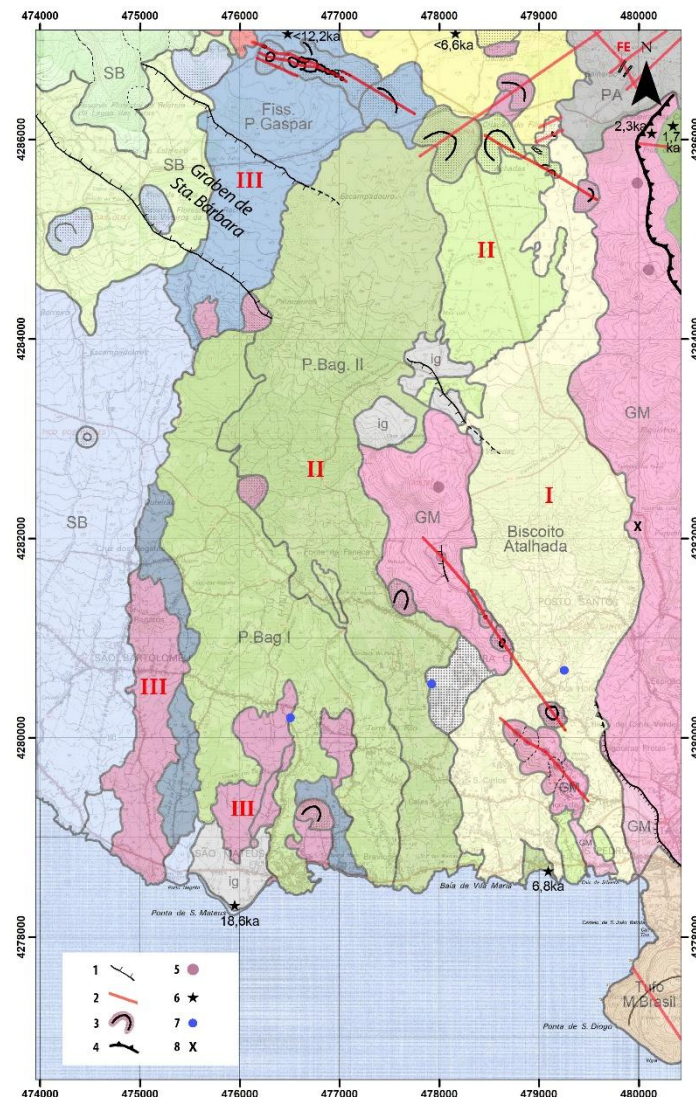


Figura 6.1 - Carta vulcanoestratigráfica da área de estudo (adaptado de Nunes *et al.*, 2024). Legenda: 1 - escarpas de falha; 2 - alinhamentos vulcanotectônicos; 3 - arco de cratera; 4 - arco de caldeira; 5 - domo traquítico s.l.; 6 - datação radiométrica, em milhares de anos; 7 - furo de captação; 8 - nascente; ig - ignimbrito das Lajes; SB - Vulcão de Santa Bárbara; GM - Vulcão Guilherme Moniz; PA - Vulcão do Pico Alto; FE - campo fumarólico das Furnas do Enxofre.

Do ponto de vista tectónico, a zona cartografada é dominada pela presença do *graben* de Santa Bárbara, de orientação geral NW-SE, cuja assinatura morfológica se perde para SE de Escampadouro (Figura 6.1), dada a idade recente das escoadas lávicas do Pico da Bagacina e do Biscoito da Atalhada. A sudeste, são os alinhamentos vulcanotectónicos NNW-SSE associados a domos e cones de escórias da Matela e Penha de França que dominam, enquanto que na parte norte da zona cartografada são os alinhamentos NE-SW associados ao Vulcão do Pico Alto-Furnas do Enxofre (Figura 6.1) e os alinhamentos WNW-ESE dos cones de escórias e de *spatter* da Zona Basáltica Fissural, entre o Pico do Gaspar e as Achadas/Criação do Filipe, que marcam a paisagem.

Refira-se que durante os trabalhos de campo de novembro de 2023 foi possível colher amostra de carvão vegetal em paleossolo coberto pelas escoadas lávicas do Pico da Bagacina (fase II) – e que se sobrepõe a depósito dos tufos surtseianos do Monte Brasil – cuja datação radiométrica pelo método ^{14}C forneceu uma idade de 6.800 anos *BP* (Nunes *et al.*, 2024).

7. Caracterização Hidrogeológica e Termal da Área de Estudo

7.1 Infiltração e Recarga de Aquíferos

A infiltração dos aquíferos objetos de estudo foi estimada de acordo com a metodologia descrita no capítulo 5.3.1. A variação espacial do índice $IRef_{adp}$ obtido está representado na Figura 7.1, que teve por base a distribuição espacial das classes de declive (Figura A.1, em anexo) e das classes da litologia aflorante (Figura A.2, em anexo).

As classes de declive e respectivos índices utilizadas para construção do mapa de declives (Figura A.1) são as representadas na Tabela A.1 (em anexo). Por sua vez, o mapa da litologia (Figura A.2) foi contruído com as classes e índices da Tabela A.2 (em anexo). Deste modo foi obtido o mapa com a variação espacial do $IRef_{adp}$, representado na Figura 7.1.

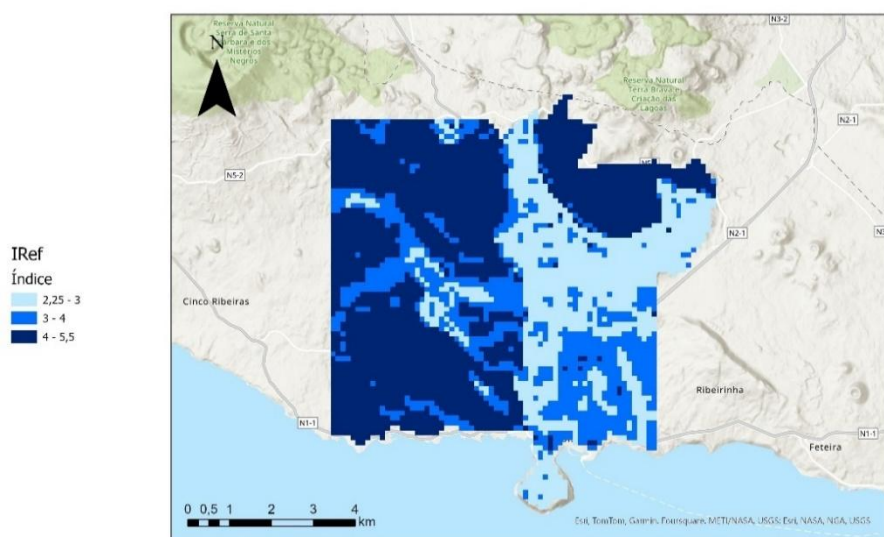


Figura 7.1 - Mapa do Índice de Referência ($IRef_{adp}$) para a área em estudo.

Os valores $IRef_{adp}$ obtidos foram divididos em três intervalos [2,25-3], [3-4] e [4-5,5], aos quais foram atribuídas as taxas de infiltração de 20%, 32% e 48%, com base nas taxas propostas nos Planos de Gestão de Região Hidrográfica (DROTRH, 2015 e DROTRH, 2021b).

O volume de água potencialmente infiltrado foi, então, calculado através da multiplicação da precipitação (Figura A.3 em anexo) pelo $IRef_{adp}$ (taxa de infiltração) (Figura 7.1). A variação espacial da água potencialmente infiltrada está representada no mapa da Figura 7.2 .

de campo e consultada em Rodrigues (2002). Nas Tabela 7.2 e Tabela 7.3 estão representados os dados recolhidos para essa caracterização. A localização dos furos de captação e as nascentes a que dizem respeito os dados está representada na Figura 5.1.

Tabela 7.2 - Características dos furos de captação e parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos captados; Legenda: NHE - nível hidroestático; NHD - nível hidrodinâmico; Q - caudal; T - transmissividade; K - condutividade hidráulica.

Referência (Furo)	Cota (m)	Profundidade (m)	Profundidade em cota (m)	Ralos (Prof.m)	Diâmetro	NHE (Prof.m)	NHD (Prof.m)	Rebaixamento (m)	Q Específico (L/sm)	T (m ² /d)	Espessura captada (m)	K (m/d)
TC	109	116,70	-7,70	109,49-116,70	10"	106,05	106,67	0,62 (Q=10 L/s)	16,13	1700	7,21	235,8
VB	168	177,35	-9,35	164,45-177,35	10"	165,37	166,87	1,49 (Q=10 L/s)	6,67	703	12,9	54,5
FR	180	222,70	-42,70	178,0-184,1 185,3-222,7	10 ^{1/4} "	178,40	214,40	36,0 (Q=10 L/s)	0,28	29	43,5	0,7
PS	155,8	159,20	-3,40	144,2-159,2	250 mm	151,80	153,60	1,8 (Q=35 L/s)	19,44	2050	15	136,6
SM	103	112,00	-9,00	94,5-109,0	315 mm	102,91	103,09	0,18 (Q=18,3 L/s)	101,67	10716	14,5	739,1

NOTAS: Furo Vinha Brava com rebaixamento = 2,05 m (c/ Q=21,6 L/s) - ensaio em 1994.

Tabela 7.3 - Altitude das nascentes e caudal drenado.

Designação	Q (L/s)	Data
Fonte da Telha 1 ¹	6,07-1,22	fev. e set. de 1998
Fonte da Telha 1	20,65	22/11/2023
Nasce Água 1 ¹	12,07-3,04	fev. e set. de 1998
Nasce Água 1	86,80	22/11/2023

1- Rodrigues (2002).

O caudal específico dos furos estudados varia entre 101,67 L/s.m e 0,28 L/s.m (Tabela 7.2). A transmissividade e a condutividade hidráulica apresentam uma grande variabilidade, com valores entre 10716 m²/dia e 29 m²/dia, e 739,1 m/dia e 0,7 m/dia, respetivamente. Na área em estudo só foi possível obter dados relativos ao caudal de duas nascentes, Fonte da Telha 1 e Nasce Água 1 (Tabela 7.3), os quais variam significativamente para a mesma nascente, entre 1,22 - 20,65 L/s na primeira e 3,04 - 86,8 L/s na segunda. Esta variação deve estar associada à época do ano em que os caudais foram medidos, mostrando forte dependência sazonal.

A localização das captações por furo sobre mapa dos complexos vulcânicos na zona de estudo (Figura 7.3) mostra que os furos que possuem maior caudal específico, transmissividade e condutividade hidráulica (furo Terra Chã e furo Posto Santo) estão a captar formações da Zona Basáltica Fissural. Em oposição, os furos que apresentam menor caudal específico, transmissividade e condutividade hidráulica (furo Vinha Brava e Furo Farrouco) captam formações do vulcão Guilherme Moniz, maioritariamente constituídas por traquitos e pedra pomes.

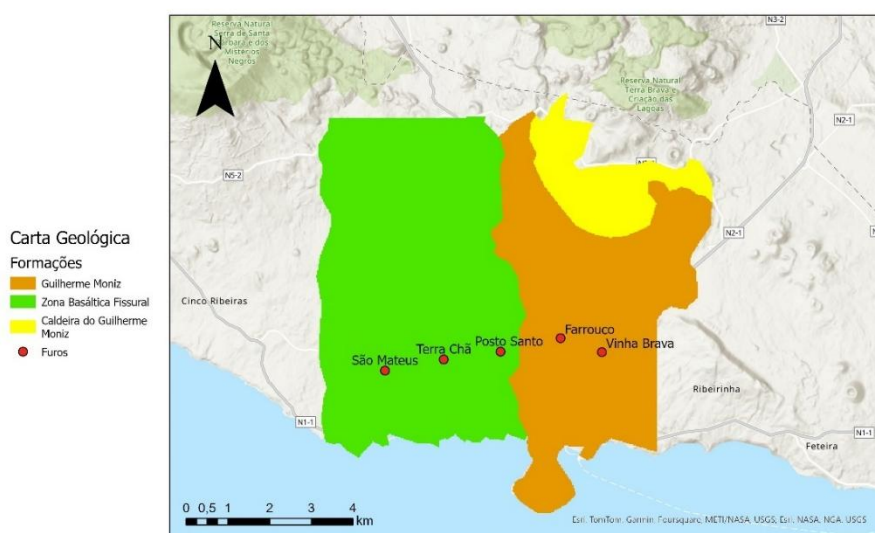


Figura 7.3 - Localização dos furos sobre os complexos vulcânicos na zona de estudo.

Os basaltos e traquitos são rochas vulcânicas que apresentam normalmente baixa porosidade primária, no entanto quando fissurados apresentam porosidade secundária elevada. A sua porosidade está então depende essencialmente da porosidade secundária, associada a fraturas e fissuras, que permitem a circulação de água. No entanto comparativamente aos basaltos, os traquitos, são rochas mais densas e compactas apresentam consideravelmente menos fraturas e, consequentemente, permeabilidade.

Os materiais pomíticos apresentam muitas vezes granulometria muito variada e uma estrutura com poros geralmente desconectados. Embora a porosidade destes materiais seja boa e permita armazenar água, a sua capacidade de transmitir a água (condutividade hidráulica) é relativamente baixa, especialmente em comparação com rochas fraturadas pouco alteradas.

7.3 Caracterização Hidrogeoquímica

A caracterização hidrogeoquímica dos recursos hídricos subterrâneos teve por base dados analíticos obtidos no âmbito desta dissertação, dados bibliográficos e resultados do Projeto INOGAZ (2008; não publicados), apresentados nas Tabela 7.4, Tabela 7.5 e Tabela 7.6.

A temperatura das águas varia entre 13,5 °C (nascente Nasce Água) e 36,4 °C (furo Posto Santo). Considerando a temperatura média do ar de cerca de 17 °C (DROTRH, 2021b), a água de três furos pode ser classificada como termal, de acordo com a classificação de Schoeller (4 °C acima da temperatura média do ar): furo da Terra Chã com 24,7 °C; furo do Farrouco com 27,3 °C; furo do Posto Santo com 36,4 °C. As nascentes litorais Bravio e Silveira possuem temperatura ligeiramente superior (20,0 e 21,7 °C, respetivamente), não se podendo ignorar a hipótese de representarem a descarga do aquífero termal junto ao litoral.

As águas desta região apresentam um pH próximo da neutralidade, variando este entre 6,22 e 7,70. De modo geral, as águas captadas em furos (235-767,5 µS/cm de condutividade elétrica, CE) e nascentes de altitude (100-217,8 µS/cm de CE) apresentam baixa condutividade elétrica e, consequentemente, baixa mineralização. As águas termais são as que apresentam maior condutividade elétrica (Tabela 7.4). No entanto, as nascentes localizadas junto ao litoral, por estarem sujeitas a mistura com aerossóis marinhos e água do mar, têm mineralização muito mais elevada, desde 4600 µS/cm (Silveira) a 15440

$\mu\text{S/cm}$ (Negrito). O furo Posto Santo também capta água mais mineralizada dos que os restantes (1657 $\mu\text{S/cm}$ de CE), provavelmente como resultado da maior interação água rocha potenciada pela temperatura da água.

O potencial redox das águas varia entre 140 mV e 315 mV, com os menores valores registados nas águas dos furos Farrouco, Posto Santo e São Mateus (Tabela 7.4).

Tabela 7.4 - Parâmetros físico-químicos das águas de nascentes e furos.

Designação	Referência	Temperatura (°C)	pH	Condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	Potencial Redox (mV)
Fonte da Telha 1	FT1	15,3	6,82	126,8	237
Fonte da Telha 3 ¹	FT3	16,0	6,90	126,0	-
Fonte da Telha 4 ¹	FT4	15,5	6,90	100,0	-
Nasce Água 1	NA1	14,9	6,97	120,5	193
Nasce Água 2 ¹	NA2	13,5	7,20	129,0	-
Nasce Água 3 ¹	NA3	15,0	6,90	120,0	-
Negrito ³	NG	16,8	6,80	15440,0	-
Bravio ³	BR	20,0	6,31	5500,0	-
Silveira ³	SIL1	21,7	6,54	4600,0	-
Silveira ¹	SIL2	15,0	7,70	144,0	-
Nascente da Lapinha	NL	17,2	6,22	217,8	315
Terra Chã ²	TC1	24,7	6,42	614,0	218
Terra Chã	TC2	24,8	6,65	767,5	258
Vinha Brava	VB	17,6	7,55	235,0	235
Farrouco ²	FR	27,3	7,33	691,0	140
Posto Santo ²	PS	36,4	6,86	1657,0	172
São Mateus	SM	15,8	6,44	315,4	162
São Mateus ⁴	SM1 ⁴	-	7,06	303,0	-

1- DROTRH-INAG (2001); 2- Projeto INOGAZ (2008); 3- Freire (2013); 4- Sondagens Batalha (2009).

As águas subterrâneas da zona em estudo apresentam composição química variada, com fácies cloretada sódica, bicarbonatada sódica e bicarbonatada magnesiano-sódico-cálcica como mostra a projeção das composições num Diagrama de Piper (Figura 7.4).

As nascentes em altitude (Fonte da Telha, Nasce Água e Lapinha) drenam água de baixa mineralização, consequente da rápida circulação e pouco tempo de permanência da água no aquífero. As nascentes que emergem ao nível do mar (Negrito, Bravio, Silveira) apresentam elevada mineralização consequente do contacto e mistura com a água do mar, tendo maior concentração em espécies iónicas típicas de água do mar como SO_4 , Cl, Na, K e Mg. Através da relação entre a concentração de cloretos presente nas amostras que contêm água do mar e a concentração de cloretos presente nas amostras recolhidas nas nascentes em altitude, é possível inferir que as amostras das nascentes do Bravio e Silveira apresentam cerca de 10% de mistura de água do mar.

A água do furo da Vinha Brava apresenta características semelhante às das nascentes em altitude. A água termal dos furos Terra Chã, Posto Santo, Farrouco é mais mineralizada e enriquecida em SiO_2 e HCO_3 , como resultado de maior temperatura, maior tempo de residência no aquífero e, consequentemente, maior interação água-rocha. A água do furo de São Mateus que não apresenta características termais e é bicarbonatada magnesiano-sódico-cálcica estando esta a captar formações basálticas do Vulcão de Santa Bárbara.

As concentrações de CO_2 total mostram claramente que as águas dos furos Terra Chã, Farrouco e Posto Santo estão fortemente enriquecidas neste gás, podendo indicar a possibilidade de se estar perante uma

água aquecida por vapor. Isto pode ser explicado pela concentração de CO₂ superior na água de Posto Santo, a mais quente. Tendo em consideração a solubilidade dos gases, esta água devia ter a menor concentração deste gás. A presença de SO₄ em maior concentração nestas águas (uma ordem de grandeza superior à das nascentes em altitude) é também indicadora da possibilidade de dissolução de H₂S(g) na água, gás esse que seria constituinte do vapor hidrotermal.

As concentrações em sílica dissolvida variam entre 29,52 mg/L na nascente Lapinha até 161,54 mg/L na água do furo Farrouco, sendo sempre mais elevada nas águas termais.

Tabela 7.5 - Composição química das águas de nascente e furos.

Referência	SiO ₂ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	Cl (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	F (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	CO ₂ Total (mg/L)	Alcalinidade (mg/L CaCO ₃)
FT1	36,58	4,69	24,60	19,00	2,96	3,23	3,20	0,12	4,42	8,05	35,00	6,60
FT3 ¹	-	9,30	27,30	36,30	2,60	3,50	1,60	-	0,00	15,30	-	12,54
FT4 ¹	-	3,60	30,70	31,20	4,30	3,20	2,10	-	0,00	16,30	-	13,36
NA1	55,62	4,40	21,10	19,90	4,10	2,20	2,20	0,53	1,05	20,98	78,00	17,20
NA2 ¹	-	5,50	25,20	36,20	4,00	2,40	3,80	-	6,40	48,40	-	39,67
NA3 ¹	-	5,70	21,30	36,90	4,40	1,40	2,20	-	1,20	27,60	-	22,62
NG ³	48,67	632,50	5153,63	2777,20	86,90	303,15	164,25	-	25,60	126,90	107,73	104,00
BR ³	66,73	274,55	2056,68	1237,30	37,60	132,10	71,48	-	15,13	165,30	174,33	135,50
SIL1 ³	59,12	176,08	1314,05	378,63	14,81	81,17	72,79	-	25,38	204,40	189,14	167,50
SIL2 ¹	-	3,80	25,90	36,00	4,50	3,10	4,50	-	3,40	52,10	-	42,70
NL	29,52	9,22	28,60	19,50	2,56	4,17	4,30	0,10	4,01	-	-	-
TC1 ²	97,14	7,09	52,70	93,70	14,50	15,20	17,20	1,03	0,58	213,50	288,64	175,00
TC2	93,28	16,00	107,00	96,00	12,40	14,40	16,70	1,12	0,97	219,60	226,00	180,00
VB	50,92	5,97	22,70	21,60	3,95	3,13	4,60	0,35	3,27	35,38	49,00	29,00
FR ²	68,68	38,20	33,00	142,00	5,62	15,80	28,20	2,33	0,03	397,70	300,96	326,00
PS ²	161,54	37,40	213,00	338,00	17,10	44,40	88,30	3,17	0,71	899,00	1152,80	737,00
SM	63,11	9,72	39,90	30,50	5,49	9,29	9,60	0,91	4,24	-	-	-
SM1 ⁴	69,00	8,10	40,00	16,00	6,10	12,20	11,00	0,90	7,40	107,00	-	87,60

1- DROTTRH-INAG (2001); 2- Projeto INOGAZ (2008); 3- Freire (2013); 4- Sondagens Batalha (2009).

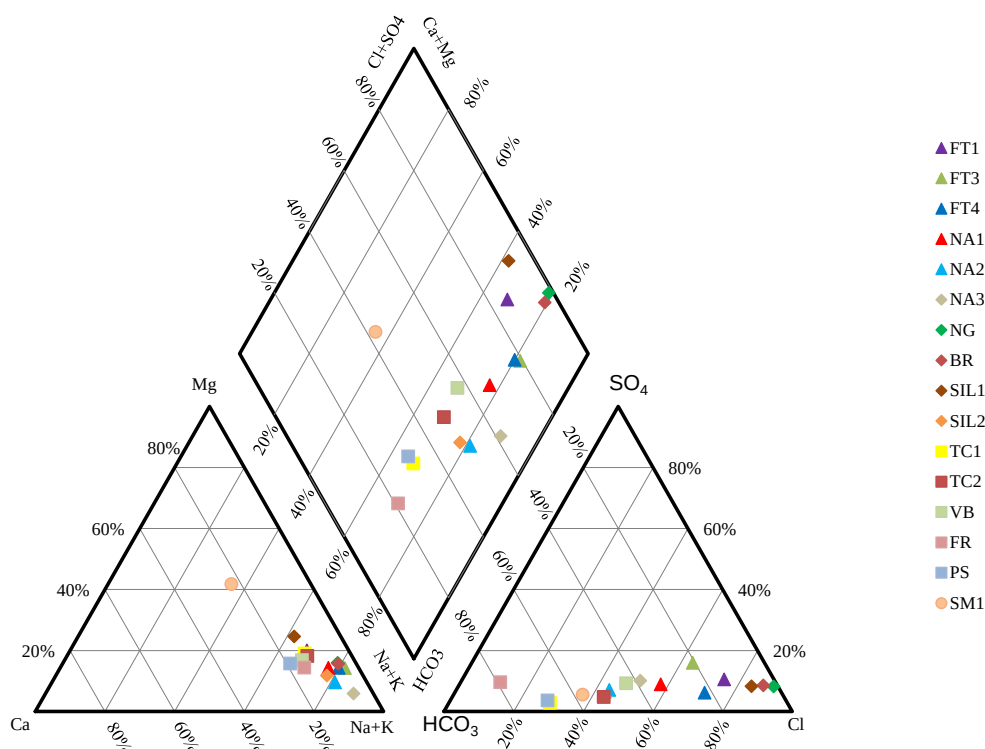


Figura 7.4 - Projeção das amostras da área em estudo num Diagrama de Piper; Legenda: FT1 - Fonte da Telha 1, FT3 - Fonte da Telha 3, FT4 - Fonte da Telha 4, NA1 - Nasce Água 1, NA2 - Nasce Água 2, NA3 - Nasce Água 3, NG - Negrito, BR - Bravio, SIL1 - Silveira, SIL2 - Silveira, TC1 - Terra Chã, TC2 - Terra Chã, VB - Vinha Brava, FR - Farrouco, PS - Posto Santo, SM - São Mateus.

Na Tabela 7.6 estão representados alguns elementos menores dissolvidos nas águas estudadas. As águas dos furos Terra Chã, Farrouco e Posto Santos e das nascentes litorais Silveira, Bravia e Negrito apresentam as maiores concentrações em Lítio, com valores entre 36 mg/L e 246 mg/L, enquanto as concentrações nas águas de nascente em altitude rondam 1-3 mg/L. Indicando a presença deste elemento por hidrotermalismo (no caso dos furos) e por eventual mistura com água do mar (nas nascentes litorais), não se descartando a possibilidade de estar também presente uma componente termal.

Tabela 7.6 - Concentração em elementos menores nas águas estudadas.

Designação	Referência	Li (µg/L)	Al (µg/L)	Mn (µg/L)	Fe (µg/L)	As (µg/L)	Rb (µg/L)	Sr (µg/L)	Ba (µg/L)
Fonte da Telha 1	FT1	2	7	0,8	< 10	0,33	16,7	23,1	1,8
Nasce Água 1	NA1	3	4	0,8	20	0,62	24,6	10,5	1,2
Negrito ²	NG	54	<100	60,3	1030	7,55	-	2170,0	11,5
Bravio ²	BR	41	11	1,8	60	12,50	-	907,0	3,5
Silveira ²	SIL1	39	11	0,7	<50	10,30	-	675,0	2,8
Nascente da Lapinha	NL	1	< 2	< 0,1	< 10	0,11	10	39,3	1,9
Terra Chã ¹	TC1	59	8	0,5	< 10	19,60	368,0	53,5	3,9
Terra Chã	TC2	36	9	0,6	< 10	17,20	53,2	117,0	3,8
Vinha Brava	VB	2	2	0,4	< 10	0,39	13,7	37,4	1,6
Farrouco ¹	FR	134	11	8,0	< 10	6,98	154,0	16,3	11,0
Posto Santo ¹	PS	246	5	8,0	< 10	8,19	744,0	39,8	0,5
São Mateus	SM	3	8	0,4	< 10	1,63	21,3	52,0	23,1

1- Projeto INOGAZ (2008); 2- Freire (2013).

As concentrações de Alumínio encontram-se mais elevadas nas nascentes da Silveira, do Bravio e no furo do Farrouco, podendo indicar alguma similaridade entre as diferentes águas.

As concentrações de Manganês e de Ferro são mais elevadas na nascente do Negrito, sendo superior a 1 mg/L nesta última. A presença destes metais em concentrações elevadas é favorecida em soluções ácidas, que facilitam a dissolução da rocha envolvente.

O Arsénio é um elemento comum em águas termais e encontra-se em maiores concentrações nos furos de Terra Chã, Farrouco e Posto Santo (17,20 µg/L, 6,98 µg/L e 8,19 µg/L, respetivamente). No entanto não são de desprezar os valores elevados nas águas das nascentes Bravio e Silveira (12,50 µg/L e 10,30 µg/L, respetivamente), podendo também ser indicador de termalismo nestas águas emergentes ao nível do mar.

O Estrôncio é encontrado em concentrações muito elevadas nas nascentes Negrito, Bravio e Silveira, entre 675 µg/L e 2170 µg/L. Este elemento é comum nas águas do mar, mostrando a presença desta componente na água das nascentes.

7.4 Composição em Isótopos Estáveis de Oxigénio e Hidrogénio

Os conteúdos em isótopos estáveis de oxigénio e hidrogénio das águas subterrâneas estudadas variam entre -16,20 ‰ e -22,95 ‰ para o δ^2H , e entre -3,44 ‰ e -4,59 ‰ para $\delta^{18}O$. Na Tabela 7.7 estão representados os resultados das análises isotópicas realizadas no âmbito desta dissertação, bem como alguns dados bibliográficos e resultados do Projeto INOGAZ (2008; não publicados).

A projeção das composições isotópicas das águas num diagrama δ^2H vs $\delta^{18}O$ (Figura 7.5), conjuntamente com a Reta das Águas Meteóricas Globais de Craig (1961) (RAMG) e as retas da Água Meteóricas Regionais dos Açores (RMR) proposta por Carvalho (1999) e por Rodrigues (2002). A maioria das

amostras cai junto à RAMG (Craig, 1961) e RMR de Rodrigues (2002). As amostras correspondentes a Campanha 1 e Campanha 2, no âmbito desta dissertação, apresentam valores que se aproximam mais da RMR de Carvalho (1999). O empobrecimento em isótopos pesados nestas amostras pode estar relacionado com procedimentos analíticos (apesar do laboratório ter sido o mesmo que o das análises realizados para o Projecto INOGAZ), ou a época/ano em que as águas foram amostradas foi mais húmido, tal como indicado pelo excesso de deutério (d , Tabela 7.7).

Tabela 7.7 - Razões isotópicas $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, excesso de deutério (d) nas águas e a respetiva cota de emergência ou de captação.

Designação	Referência	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	d (‰)	Cota (m)
Fonte da Telha 1	FT1	-3,95	-18,6	13	340
Fonte da Telha1 ²	FT1b	-4,03	-22,95	9,29	340
Nasce Água 1	NA1	-3,94	-19	12,52	250
Nasce Água 1 ²	NA1b	-3,81	-19,6	10,88	250
Terra Chã ¹	TC1	-3,59	-19,4	9,32	0,05
Terra Chã	TC2	-3,97	-19,5	12,26	0,05
Terra Chã ¹	TC3	-3,53	-17,2	11,04	0,05
Terra Chã	TC4	-4,50	-20,4	15,6	0,05
Vinha Brava	VB	-4,19	-21,7	11,82	9,63
Vinha Brava	VB1	-4,4	-19,9	15,3	9,63
Farrouco ¹	FR	-3,55	-20,3	8,1	0,8
Posto Santo ¹	PS	-3,44	-16,2	11,32	5
Posto Santo ¹	PS1	-3,47	-18	9,76	5
São Mateus	SM	-4,59	-20,4	16,32	0

1- Projeto INOGAZ (2008); 2- Rodrigues (2002).

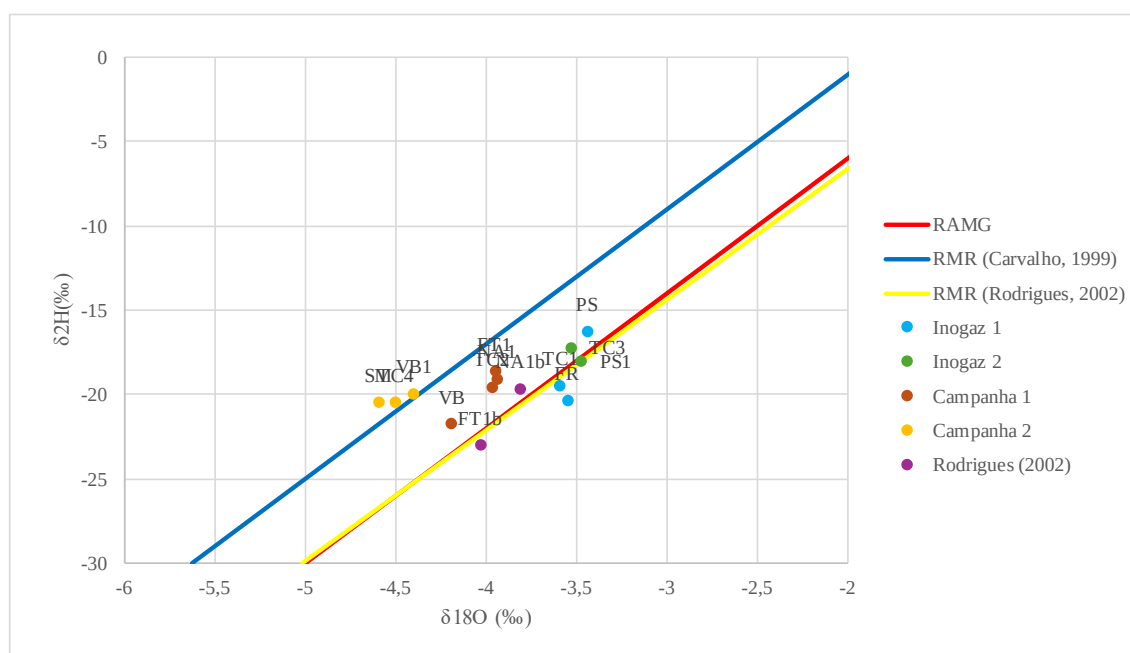


Figura 7.5 - Projeção da composição isotópica das amostras num diagrama $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$, conjuntamente com a RAMG (Reta das Águas Meteoricas Globais), RMR (Reta Meteorica Regional dos Açores, proposta por Carvalho, 1999) e a RMR (Rodrigues, 2002) (Reta Meteorica Regional dos Açores proposta por Rodrigues (2002)); Legenda: FT1 - Fonte da Telha 1, FT2 - Fonte da Telha 1, NA1 - Nasce Água 1, NA2 - Nasce Água 1, TC1 - Terra Chã, TC2 - Terra Chã, TC3 - Terra Chã, TC4 - Terra Chã, VB1 - Vinha Brava; VB2 - Vinha Brava, FR - Farrouco, PS1 - Posto Santo, PS2 - Posto Santo, SM - São Mateus.

A amostra de Posto Santo é a que apresenta maior enriquecimento isotópico em relação as restantes nascentes e furos. Este processo de enriquecimento que pode estar associado a fenómenos de evaporação, interação água-rocha, favorecida pela temperatura, ou de mistura de águas.

Os valores mais negativos podem estar associados a eventos de condensação, enquanto os valores que se encontram acima de RMR de Carvalho (1999) podem ser resultado da existência de um microclima, onde a precipitação é mais leve, no entanto todos os valores se encontram dentro do erro analítico de 0,1‰ para $\delta^{18}O$ e 1‰ para δ^2H .

O excesso de deutério é um bom indicador da humidade e temperatura de uma certa região e de acordo com os valores da Tabela 7.7, o valor médio do excesso de deutério para o conjunto de amostras em estudo é de 11,55 ‰. Rodrigues (2002) considera que 9,4 ‰ o valor médio de excesso de deutério que melhor se ajusta às características do arquipélago dos Açores, portanto pode considerar-se que as amostras analisadas são representativas das características da região.

A composição isotópica das nascentes Fonte da Telha 1 e Nasce Água 1 permitiu traçar uma reta de regressão entre as razões isotópicas $\delta^{18}O$ e a altitude de captação (Figura 7.6).

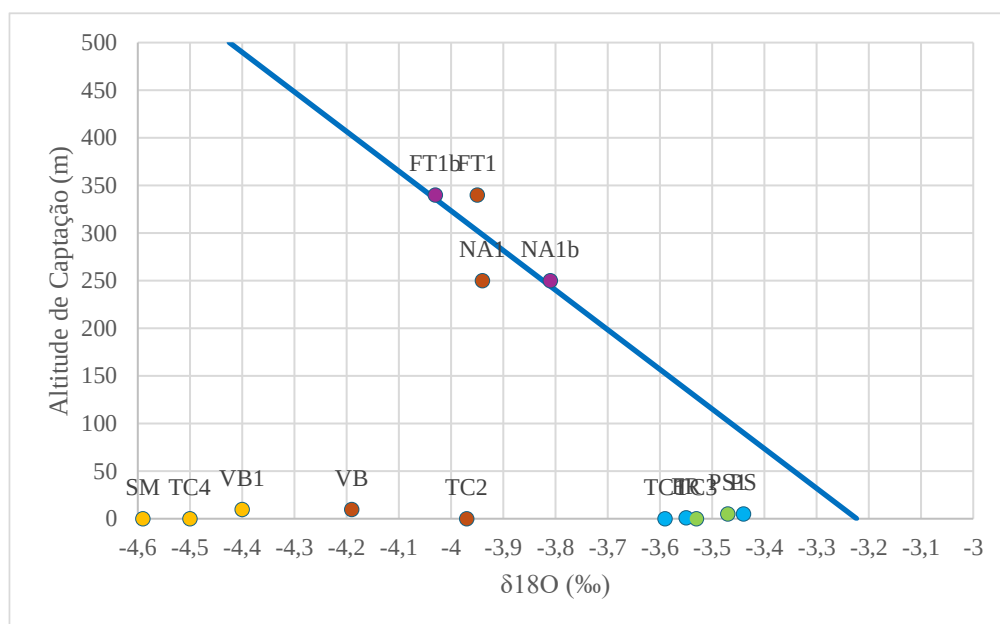


Figura 7.6 - Projeção do conteúdo em $\delta^{18}O$ e a cota (m) de emergência ou de captação da água; Legenda: FT1 - Fonte da Telha 1, FT2 - Fonte da Telha 1, NA1 - Nasce Água 1, NA2 - Nasce Água 1, TC1 - Terra Chã, TC2 - Terra Chã, TC3 - Terra Chã, TC4 - Terra Chã, VB1 - Vinha Brava; VB2 - Vinha Brava, FR - Farrouco, PS1 - Posto Santo, PS2 - Posto Santo, SM - São Mateus.

As amostras de água dos furos Posto Santo e Terra Chã encontram-se enriquecidas em isótopos de $\delta^{18}O$. Pode ser resultado de uma mistura de uma água termal com características isotopicamente mais pesados ou mistura com águas marinhas.

Nota-se que uma das amostras do furo de Terra Chã (TC2) apresenta um empobrecimento em $\delta^{18}O$ o que resulta numa altitude de recarga semelhante à das nascentes. Este empobrecimento pode estar relacionado com o facto do furo não se encontrar em funcionamento, como os restantes amostrados, tendo sido apenas acedido para a recolha das amostras realizadas no âmbito desta dissertação.

7.5 Geotermometria das águas termais

Utilizando os geotermómetros aquosos descritos no subcapítulo 5.3.4 foi estimada a temperatura de equilíbrio, em profundidade, das águas termais associadas ao aquífero de Angra do Heroísmo. Os geotermómetros foram aplicados a águas com temperatura igual ou superior a 20°C, furos e nascentes litorais.

Na Tabela 7.8. estão expressas as temperaturas de reservatório obtidas através dos geotermómetros de Sílica. Os geotermómetros com base no equilíbrio com o Quartzo, mostram temperaturas entre 113 °C (nascente Silveira) e 166 °C (furo Posto Santo). As temperaturas obtidas para equilíbrios com outras formas de sílica, Calcedónia e Cristobalite são mais baixas, não ultrapassando os 143 °C e 116 °C, respetivamente. Os geotermómetros de Opala-CT e Sílica Amorfa dão temperaturas muito baixas e irrealistas.

No cálculo dos geotermómetros de sílica foi tida em consideração a possível mistura de 10% com água do mar.

Tabela 7.8 - Temperaturas de reservatório obtidas com geotermómetros aquosos de Sílica.

Designação	Referência	Temperatura (°C)					
		Quartzo (S=0)	Quartzo(H=0)	Calcedónia	Cristobalite	Opala-CT	Sílica amorfa
Bravio ²	BR	121	119	92	70	22	2
Silveira ²	SIL1	114	113	86	64	16	-3
Terra Chã ¹	TC1	136	131	109	85	36	15
Terra Chã	TC2	133	129	106	83	34	14
Farrouco ¹	FR	117	116	89	67	19	-1
Posto Santo ¹	PS	166	157	143	116	66	43

1- Projeto INOGAZ (2008); 2- Freire (2013).

As temperaturas obtidas através das equações para geotermómetros Na/K estão representadas na Tabela 7.9. Não foram estimadas temperaturas de reservatórios para as águas de nascente por estas terem contributo de sais marinhos (Na e K). Com base nestes geotermómetros as temperaturas variam entre 217 e 270 °C para a água do furo Terra Chã (temperatura captada = 24,8 °C), entre 106 e 168 °C no furo Farrouco (temperatura captada = 27,3 °C), e entre 124 e 183 °C no furo Posto Santo (temperatura captada = 36,4 °C). Tendo em conta a temperatura de captação da água do furo Terra Chã e do facto de se tratar de um sistema de baixa entalpia, as temperaturas obtidas por estes geotermómetros aquosos parecem muito elevadas.

Tabela 7.9 - Temperaturas de reservatório obtidas com geotermómetros aquosos Na/K.

Designação	Referência	Temperatura (°C)					
		(5.15)	(5.16)	(5.17)	(5.19)	(5.20)	(5.21)
Terra Chã ¹	TC1	240	251	244	258	243	270
Terra Chã	TC2	217	226	223	240	226	254
Farrouco ¹	FR	106	109	116	149	137	168
Posto Santo ¹	PS	124	128	134	165	153	183

1- Projeto INOGAZ (2008).

As temperaturas obtidas através dos geotermómetros Na-K-Ca estão representadas na Tabela 7.10. Neste caso, dependendo da equação utilizada, as temperaturas resultantes ou são muito baixas (equação (5.22)) ou excessivamente altas. No entanto é relevante mencionar que as temperaturas obtidas para o Farrouco e Posto Santo são irrealistas pois as temperaturas são muito inferiores às expectáveis. Este facto é

evidente em Posto Santo, onde a temperatura de campo é superior à temperatura obtida pela equação (5.22), que corresponde a uma temperatura de reservatório e como tal deveria ser substancialmente superior. As temperaturas de TC1 e TC2 encontram-se dentro de um intervalo de valores expectável, contudo existe uma ligeira discrepância entre os valores obtidos em ambas as amostras.

Estes geotermómetros de Na-K-Ca não parecem aplicar-se bem a este tipo de águas, de fácies fundamentalmente sódica.

Tabela 7.10 - Temperaturas de reservatório obtidas com geotermómetros aquosos Na-K-Ca.

Designação	Referência	Temperatura (°C)		
		(5.22)	(5.23)	(5.24)
Terra Chã ¹	TC1	81	264	258
Terra Chã	TC2	78	270	250
Farrouco ¹	FR	39	255	180
Posto Santo ¹	PS	36	226	179

1- Projeto INOGAZ (2008).

As temperaturas obtidas através dos geotermómetros K-Mg, estão representadas na Tabela 7.11. Todos os valores calculados através das equações (5.25) e (5.27) podem ser considerados irrealistas, por resultarem temperaturas sobreestimadas ou subestimadas. As temperaturas geotermométricas obtidas com a equação (5.26) variam entre 102 °C no furo Terra Chã e 57 °C no furo Farrouco, mais baixas do que as obtidas com os geotermómetros de quartzo, mas dentro de valores aceitáveis.

Tabela 7.11 - Temperaturas de reservatório obtidas com geotermómetros aquosos K-Mg.

Designação	Referência	Temperatura (°C)		
		(5.25)	(5.26)	(5.27)
Terra Chã ¹	TC1	343	102	-65
Terra Chã	TC2	340	95	-60
Farrouco ¹	FR	322	57	-25
Posto Santo ¹	PS	335	84	-51

1- Projeto INOGAZ (2008).

As temperaturas obtidas através dos geotermómetros Na-Li estão representadas na Tabela 7.12. Os valores resultantes da aplicação das equações (5.28) e (5.30) são coerentes, mas os obtidos com a equação (5.29) são inválidos. A água do furo Farrouco é a que apresenta temperatura de reservatório mais elevada, atingindo 145 °C.

Tabela 7.12 - Cálculo de geotermómetros de Na-Li.

Designação	Referência	Temperatura (°C)		
		(5.28)	(5.29)	(5.30)
Terra Chã ¹	TC1	126	5	86
Terra Chã	TC2	105	-11	63
Farrouco ¹	FR	145	20	106
Posto Santo ¹	PS	133	10	93

1- Projeto INOGAZ (2008).

Para completar o estudo da geotermometria aquosa projetaram-se as amostras num digrama de Giggenbach (representado na Figura 7.7), que tem em consideração as temperaturas de equilíbrio para as espécies Na-K-Mg.

As águas termais de Angra do Heroísmo caem todas no campo das águas imaturas, indicando que as águas não estão em equilíbrio termodinâmico. Isso pode dever-se a pouco tempo de residência no aquífero, a mistura com outras águas mais frias ou à entrada de gases ácidos (maioritariamente CO₂). A amostra Bravio (BR) é a que se aproxima mais do equilíbrio parcial, no entanto sendo uma nascente ao nível do mar é normal apresentar valores de sódio mais elevados por isso não se deve considerar para a análise deste geotermómetro.

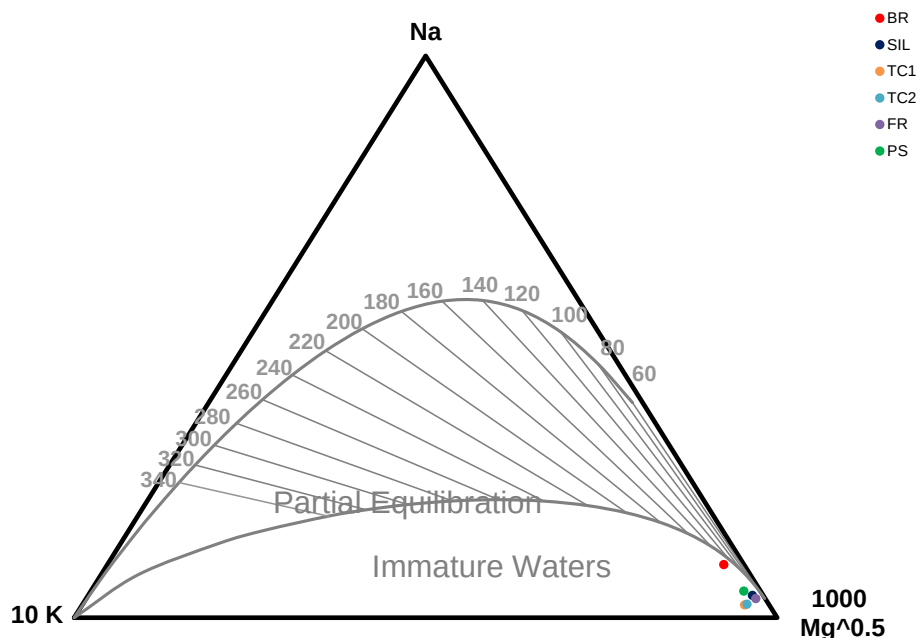


Figura 7.7 - Projeção das águas termais num Diagrama de Giggenbach; Legenda: BR - Bravio, SIL - Silveira, TC1 - Terra Chã, TC2 - Terra Chã, FR - Farrouco, PS - Posto Santo.

As temperaturas de reservatório também foram calculadas a partir dos equilíbrios termodinâmicos com vários minerais, utilizando-se os índices de saturação das águas calculados com o programa PHEEQCI. As representações gráficas dos índices de saturação em função da temperatura estão nas Figura A.4, Figura A.5, Figura A.6 e Figura A.7 (em anexo). Para facilitar a interpretação das temperaturas geotermométricas assim obtidas foi elaborada a Tabela 7.13.

Tabela 7.13 - Temperaturas de equilíbrio das águas em relação a várias fases minerais.

Referência	Temperatura (°C)											
	Quartzo	Calcedónia	Feldespato-K	Mica-K	Albite	Calcite	Montmorillonite	Clorite	Crisotilo	Ilite	Silica amorfa	Talco
TC1 ¹	140	110	55	110	-	100	75	100	115	65	-	70
TC2	140	120	55	110	20	100	70	85	100	60	-	60
FR ¹	117	90	45	92	35	40	58	50	70	50	-	-
PS ¹	165	140	65	105	50	20	70	60	80	60	45	20

1- Projeto INOGAZ (2008).

As temperaturas obtidas através dos índices de saturação são coerentes e expectáveis. As temperaturas obtidas para estes minerais em alguns casos são inferiores aos valores esperados, pois estas temperaturas estão associadas a minerais com temperaturas de equilíbrio mais baixas. Ao contrário dos outros geotermómetros estas temperaturas apresentam uma maior uniformidade na gama de temperaturas obtidas, facto que só ocorreu nos geotermómetros de Sílica.

8. Modelo Conceptual

Como referido anteriormente, a zona de estudo integra formações geológicas pertencentes a três sistemas vulcânicos da ilha Terceira: os vulcões centrais de Guilherme Moniz e Santa Bárbara e a Zona Basáltica Fissural. Na parte leste engloba formações com génese no Vulcão de Guilherme Moniz, cujos flancos sul são constituídos por um conjunto de espessas escoadas lávicas do tipo domos e coulées, de traquitos comendíticos (Self, 1982), bem como por centros eruptivos basálticos (Nunes, 2000). Para oeste, estas formações estão sobrepostas por escoadas lávicas basálticas e cones de escórias da Zona Basáltica Fissural - ZBF (Figura 8.1). Na parte mais ocidental da zona de estudo, e por baixo das formações geológicas da ZBF, ocorrem as formações geológicas associadas ao Vulcão de Santa Bárbara, constituídas por depósitos pomíticos de queda e escoadas lávicas basálticas (Figura 8.2). Na zona de estudo são evidentes os vários acidentes tectónicos que condicionam a localização dos centros eruptivos e que compartimentam as formações geológicas presentes. A orientação geral predominante destes acidentes é NNW-SSE e WNW-ESE, seguindo-se a orientação aproximada de N-S, esta última representada nomeadamente pela Falha do Espigão e pela Falha da Memória localizadas na zona de Angra do Heroísmo (Nunes, 2000).

Do ponto de vista hidrogeológico, a zona de estudo representa bem um modelo conceptual insular, com aquíferos suspensos, livres a semi-confinados, em altitude e aquíferos de base, confinados, semi-confinados a livres, que fazem fronteira com a água do mar (Figura 8.3).

Os aquíferos suspensos desenvolvem-se, fundamentalmente, em rochas traquíticas do Vulcão Guilherme Moniz, estando representados e drenados na zona de estudo pelos conjuntos de nascentes Nasce Água e Fonte da Telha. As emergências encontram-se a altitudes de 250 m e 340 m, respetivamente. A água é fria, pouco mineralizada, com fácies hidroquímica típica de circulação em rochas traquíticas e com tempos de residência relativamente pequenos.

Os aquíferos de base desenvolvem-se em escoadas traquíticas do Guilherme Moniz, na parte mais oriental, e em escoadas lávicas basálticas da Zona Basáltica Fissural, na parte central e ocidental da zona de estudo. São drenados por nascentes junto ao litoral e captados por furos para abastecimento público. Na Figura 8.2 está representado um perfil geológico (A-B), com direção geral E-W, que inclui informação compilada a partir dos *logs* de sondagem dos relatórios técnicos dos furos de captação de São Mateus (Sondagens Batalha, 2009), Terra Chã (Intertec, 1995b), Posto Santo (Iceland Drilling, 1995) e Farrouco (Intertec, 1995b), onde são evidenciadas as formações geológicas dos diferentes sistemas vulcânicos em que os aquíferos captados se integram. De acordo com a descrição litológica disponível (Sondagens Batalha, 2009) o furo de São Mateus estará a captar formações basálticas associadas ao Vulcão de Santa Bárbara, enquanto os furos de Terra Chã e Farrouco captam materiais traquíticos associados ao Vulcão Guilherme Moniz (Intertec, 1995b; Intertec, 1995a). Por sua vez, e de acordo com o respetivo *log* de sondagem, o furo Posto Santo estará a captar formações da Zona Basáltica Fissural (Iceland Drilling, 1995).

Estes aquíferos drenam águas de mineralização mais elevada do que as de aquíferos suspensos, como resultado do maior tempo de residência e de interação água-rocha. Junto ao litoral, na zona de interface água doce-água salgada, as águas adquirem maior salinização. O nível hidrostático medido no interior dos furos encontra-se pouco acima do nível médio do mar (cota do nível hidrostático 3 m em Terra Chã, 2,6 m em Vinha Brava, 1,6 m em Farrouco, 4 m em Posto Santo e 0,09 m em São Mateus). O escoamento subterrâneo faz-se, fundamentalmente, de norte para sul em direção ao mar, com gradiente inferior ao da superfície topográfica (Figura 8.3). A espessura de aquífero captada pelos furos varia entre 7,1 m em Terra Chã até 43,5 m em Farrouco.

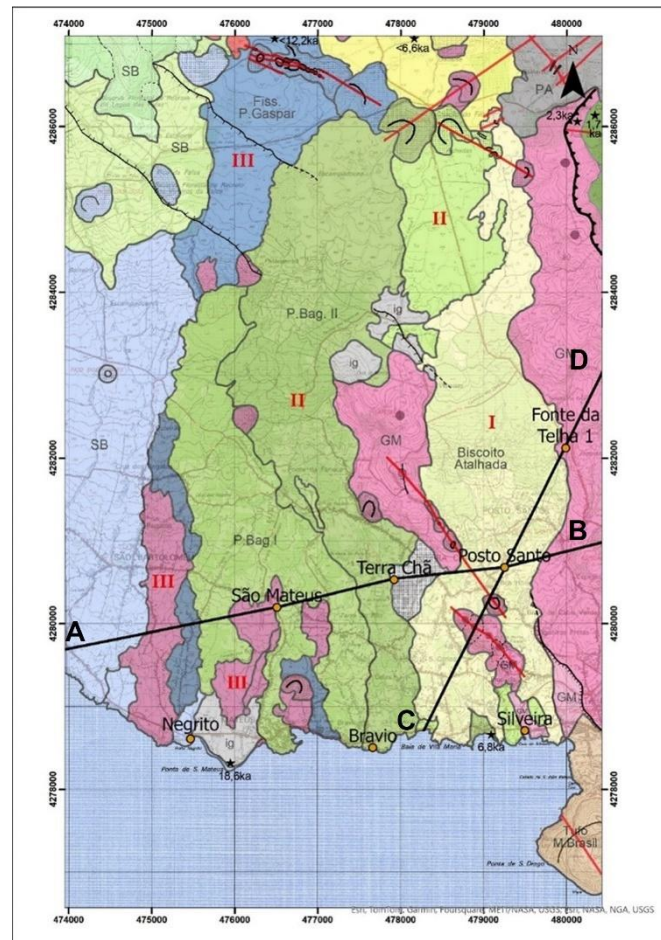


Figura 8.1 - Cartografia vulcanológica da área de estudo (Nunes et al., 2024), localização de furos de captação e nascentes e representação do traçado dos perfis geológicos A-B e C-D.

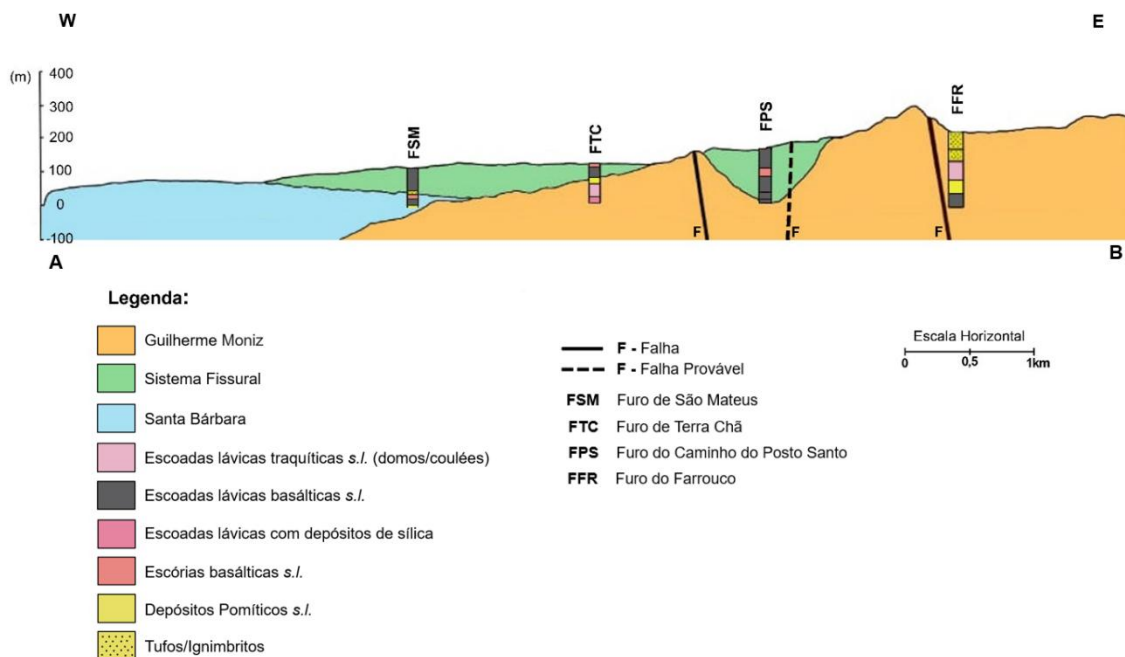


Figura 8.2 - Perfil geológico interpretativo A-B, com base na cartografia vulcanológica de superfície e em logs de sondagem de furos de captação. Adaptado de Nunes et al. (2024).

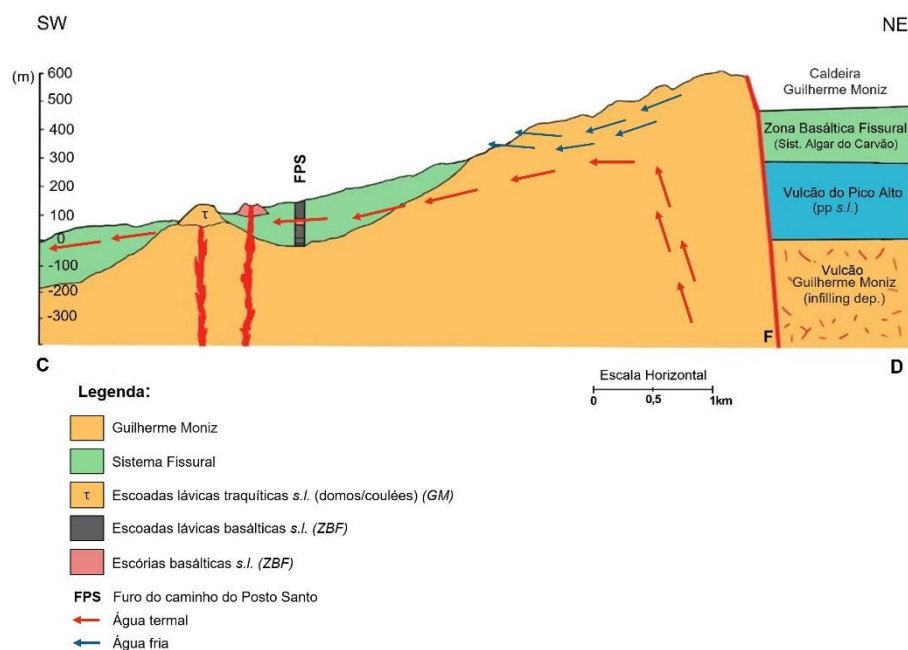


Figura 8.3 - Perfil geológico interpretativo C-D, com base na cartografia vulcanológica de superfície e em log de sondagem do furo de captação Posto Santo. Adaptado de Nunes et al. (2024).

Algumas das nascentes (Bravio e Silveira) e furos de captação (Terra Chã, Posto Santo e Farrouco) possuem água com características físico-químicas (temperatura, mineralização, alguns elementos dissolvidos) que apontam para a presença de termalismo.

A região em que se observa esta assinatura termal corresponde a uma faixa que se desenvolve na direção N-S, limitada lateralmente pelos furos Vinha Brava e São Mateus, os quais captam já água fria. A interpolação das temperaturas das águas de furos e nascentes na zona de estudo, às quais se adicionaram temperaturas das fumarolas das Furnas do Enxofre e da zona central da ilha (pelo método *Topo to Raster*; Figura 8.4) realça a zona de anomalia térmica, com um eixo de fluxo mais quente a oeste de Angra do Heroísmo, na zona do Posto Santo (temperatura da água no furo é de 36,4 °C). A anomalia térmica induz à interpretação da existência de uma zona de ascensão de água termal (*upflow*), mais quente, a montante, que se movimenta para sul, em direção ao mar, ao longo das escoadas lávicas. Não obstante a cartografia geológica e tectónica realizada, a inexistência de dados termométricos, geofísicos (e.g. resistividade elétrica) ou geoquímicos (e.g. difusão de CO₂, radão, etc.) no sector mais a norte da zona de estudo, não permitem identificar com precisão qual a zona de ascensão do fluido termal ocorrente nos furos de captação e nascentes termais.

A análise das temperaturas geotermométricas obtidas para as águas termais aponta para temperaturas de equilíbrio que não devem ser superiores a 110-120 °C. Sendo esta a temperatura do fluido termal na zona de ascensão, a água arrefece depois por condução durante o escoamento subterrâneo ao longo do aquífero termal de Angra do Heroísmo até ao mar, onde as emergências registam temperatura da ordem de 20 °C.

A composição química das águas termais, nomeadamente a presença de elevadas concentrações de CO₂ total (1153 mg/L na água do furo Posto Santo) é indicadora que o fluido termal na zona de *upflow* é muito enriquecido em gases vulcânicos, ou mesmo em vapor, sendo esta a principal fonte de calor do aquífero termal de Angra do Heroísmo.

A interpretação integrada de toda a informação aqui compilada permite dizer que o aquífero termal de Angra do Heroísmo tem início no setor norte da zona de estudo, numa zona onde a tectónica confere permeabilidade suficiente para que um fluido com temperatura próxima da ebulição ascenda e seja depois escoado para sul em direção ao mar, em materiais permeáveis que podem estar associados a formações mais recentes do Vulcão Guilherme Moniz e/ou a formações mais antigas da base da Zona Basáltica Fissural. A espessura do aquífero é variável e estará condicionada às espessuras dos materiais mais permeáveis, mas não deve ser muito superior à espessura máxima captada no Furo de Farrouco (≈ 50 m). O nível hidrostático estará poucos metros acima da cota 0 m, sendo tanto menor quanto maior a proximidade ao mar.

O calor disponível no aquífero termal de Angra do Heroísmo diminui de norte para sul (de 110-120 °C a 20 °C) e do centro para a periferia.

Os pressupostos atrás indicados e o modelo conceptual aqui proposto constituem a base para o cálculo do recurso geotérmico associado ao aquífero termal de Angra do Heroísmo.

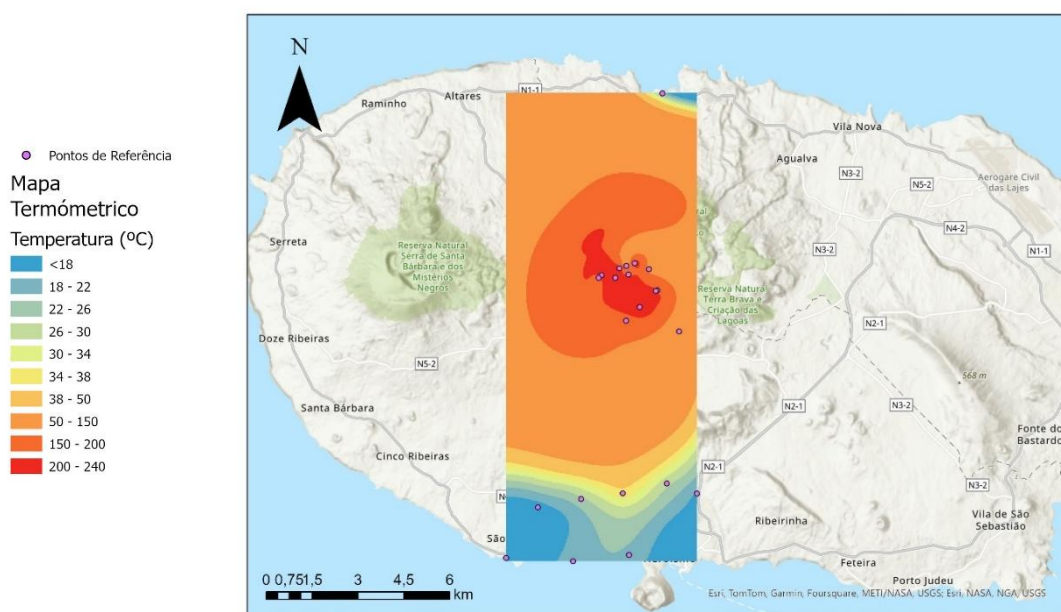


Figura 8.4 - Mapa de temperatura da água subterrânea, por interpolação pelo método Topo to Raster.

9. Estimativa do potencial geotérmico

A estimativa do potencial geotérmico do sistema hidrotermal de Angra do Heroísmo foi obtida a partir de um modelo geológico e modelo térmico que contemplam 8 x 13 células (X*Y) e espessura de captação média de 12 m.

O modelo geológico considera que a litologia do reservatório está representada por escoadas traquíticas e basálticas, condicionando os valores das propriedades petrofísicas atribuídas às formações (porosidade, densidade da rocha e calor específico da rocha) (Tabela 9.1).

O modelo térmico do reservatório teve como base as temperaturas representadas na Figura 8.4 e as temperaturas geotermométricas, obtidas através das composições químicas das águas. As temperatura de reservatório consideradas no modelo termométrico estando na Figura 9.1, sendo a temperatura máxima de *upflow* 110 °C.

O cálculo do potencial energético recuperável, *Hrec*, teve em consideração o aproveitamento do recurso através de uma central geotérmica com fator de eficiência de conversão de 0,85, fator de produção de 0,95, temperatura de rejeição de 20 °C e tempo médio de vida de 30 anos (Tabela 9.1).

Tabela 9.1 - Propriedades e parâmetros da rocha e fluido utilizados para a estimativa do potencial geotérmico.

Pârametros	Distribuição Normal	
	Média	Desvio padrão
Porosidade (Φ)	0,075	0,025
Densidade do fluido (ρ_F)(kg/m ³)	985	35
Calor específico do fluido (C_F)(kJ/kg°C)	4,18	0,1
Densidade da rocha (ρ_r)(kg/m ³)	2900	200
Calor específico da rocha (C_R)(kJ/kg°C)	0,87	0,03
Fator de recuperação	0,1	0,01
Temperatura de Rejeição (°C)	20	
Coeficiente de eficiência de conversão elétrica (C_e)	0,85	
Fator da Central (P_f)	0,95	
Tempo de vida médio da Central (T_{live})(anos)	30	

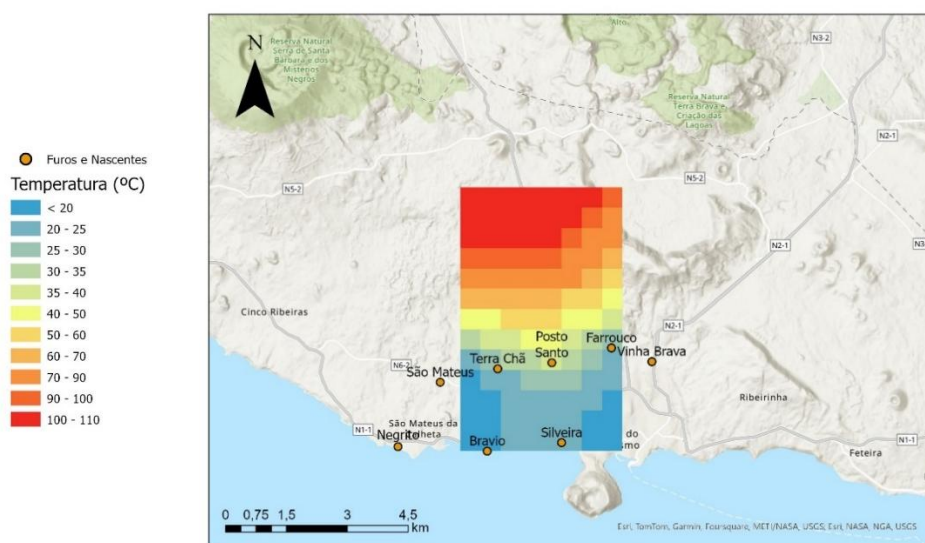


Figura 9.1 - Mapa de temperatura da água no reservatório geotérmico, dividido em células de 500x500 m.

O potencial geotérmico, *Heat-In-Place (HIP)*, calculado analiticamente utilizando a equação (5.31) e os valores médios das variáveis correspondentes, é da ordem de 33 PJ (Petajoule) equivalente a 35 MW.

Para a estimativa do potencial energético, através do *software* 3DHIP, foi utilizado um modelo de distribuição normal (PDF), estando os resultados graficamente representados nas Figura 9.2 (distribuição normal) e Figura 9.3 (curva de probabilidade).

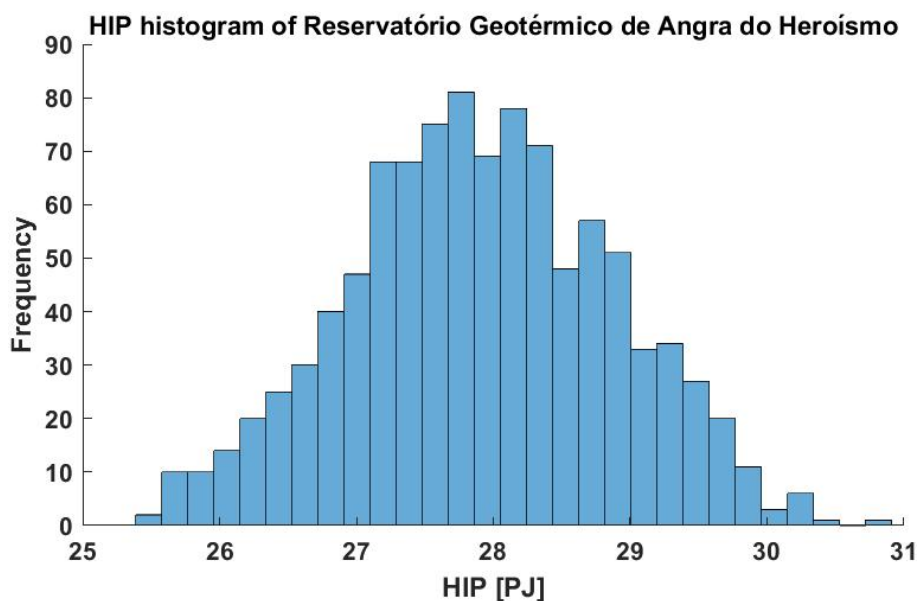


Figura 9.2 - Distribuição normal (PDF) do potencial geotérmico, *Heat-In-Place (HIP)*, do reservatório de Angra dos Heroísmo.

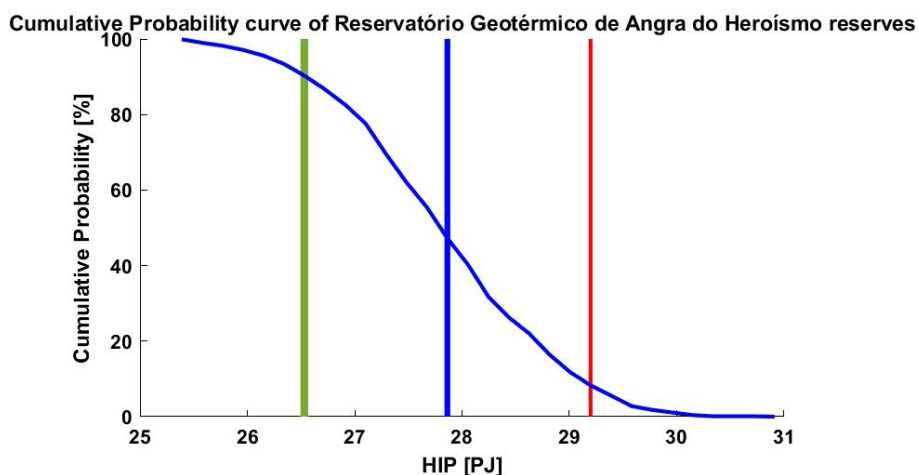


Figura 9.3 - Curva de probabilidade do potencial geotérmico, *Heat-In-Place (HIP)*, do reservatório geotérmico, de Angra dos Heroísmo.

Os resultados obtidos encontram-se expressos na Tabela 9.2. O potencial energético do sistema hidrotermal de Angra do Heroísmo é de 28,04 MW, com uma probabilidade de 90% (P90), de 29,45 MW com probabilidade de 50% (P50) e 30,86 MW com probabilidade de 10% (P10). A Figura 9.4 representa a distribuição espacial do potencial energético (*HIP*) e do potencial energético recuperável (*Hrec*) do sistema geotérmico, considerando um tempo de vida da central geotérmica de 30 anos.

Tabela 9.2 - Potencial energético do sistema geotérmico de Angra do Heroísmo, Heat-In-Place (HIP). Legenda: P90 - Probabilidade de 90%, P50 - Probabilidade de 50%, P10 - Probabilidade de 10 %, PJ - Petajoule.

Heat-In-Place (HIP) (30 anos)		
Probabilidade	PJ	MW
P90	26,53	28,04
P50	27,86	29,45
P10	29,20	30,86

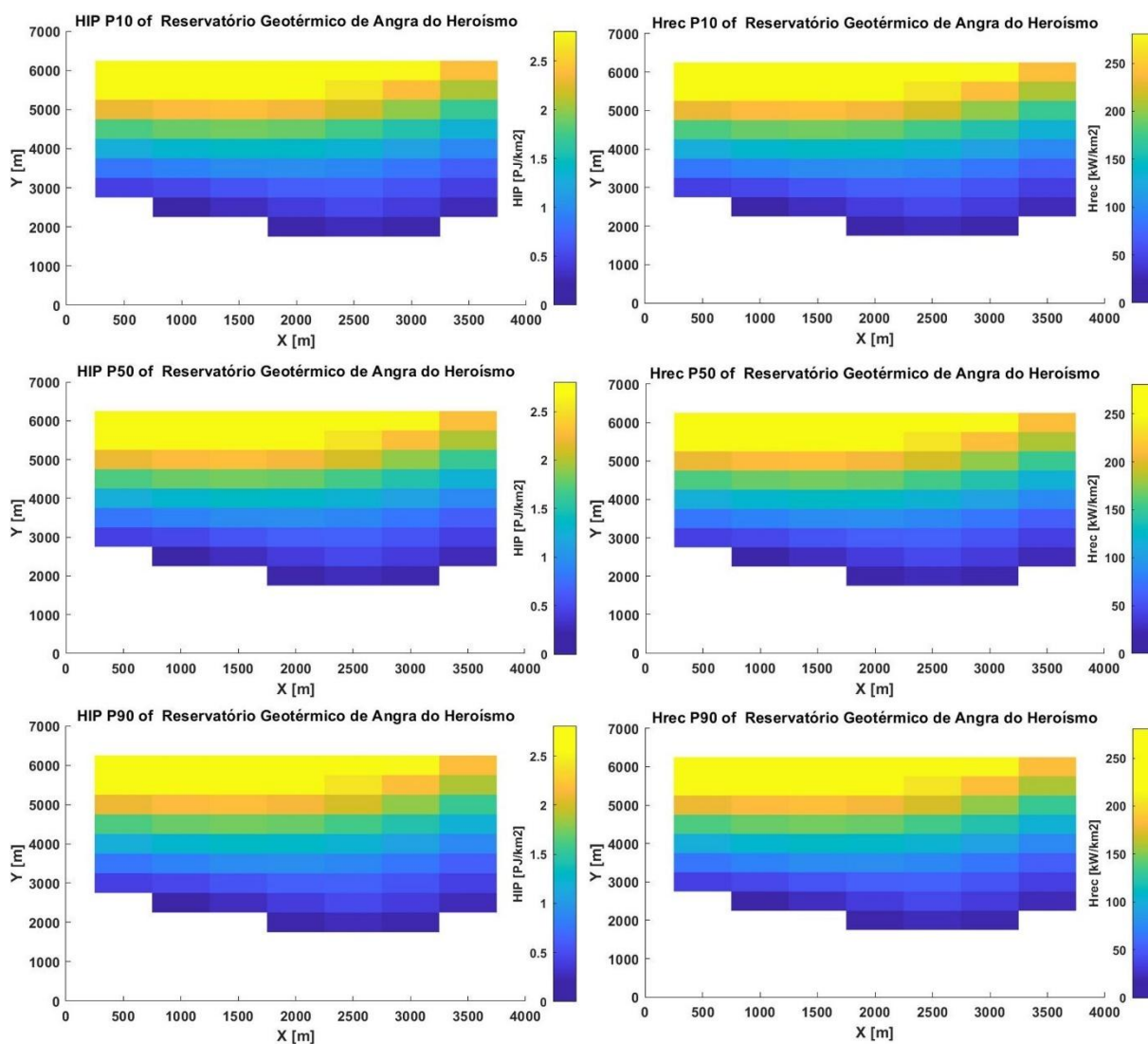


Figura 9.4 - Variação espacial do potencial energético, HIP (P10, P50, P90) e potencial energético recuperável, Hrec (P10, P50, P90), do sistema geotérmico de Angra do Heroísmo.

10. Conclusões

O reservatório geotérmico de Angra do Heroísmo desenvolve-se em formações geológicas pertencentes ao Vulcão de Guilherme Moniz e Santa Bárbara e à Zona Basáltica Fissural (ZBF) da Terceira. A região apresenta diversas falhas que influenciam a localização dos centros eruptivos e segmentam as formações geológicas. As direções predominantes destas falhas são NNW-SSE e WNW-ESE, complementadas por estruturas orientadas aproximadamente a N-S.

Do ponto de vista hidrogeológico, a zona de estudo apresenta um modelo insular, com a presença de aquíferos suspensos e de base. Os aquíferos suspensos, desenvolvidos principalmente em rochas traquíticas do Vulcão Guilherme Moniz, são drenados pelas nascentes de água fria, pouco mineralizada e apresentam uma fácies hidroquímica típica de circulação em rochas traquíticas, com tempos de residência relativamente curtos. Os aquíferos de base distribuem-se pelas escoadas traquíticas do Guilherme Moniz na parte oriental e pelas escoadas lávicas basálticas da ZBF nas partes central e ocidental da zona de estudo. Estas águas são drenadas por nascentes próximas ao litoral e captadas por furos para abastecimento público. A recarga dos aquíferos é estimada em 34,9 hm³/ano. As medições do nível hidrostático nos furos indicam valores ligeiramente acima do nível médio do mar e o escoamento subterrâneo ocorre de norte para sul, em direção ao mar, com um gradiente inferior ao da superfície topográfica. As formações pertencentes à Zona Basáltica Fissural apresentam valores máximos de transmissividade de 10716 m²/dia, de condutividade hidráulica 739,1 m/dia e o caudal específico máximo dos furos dos furos é de 101,67 L/s.m. Por outro lado, as formações pertencentes ao Vulcão Guilherme Moniz apresentam valores de transmissividade de apenas 29 m²/dia, 0,7 m/dia de condutividade hidráulica e o caudal específico máximo dos furos de 0,28 L/s.m. A espessura captada dos aquíferos varia entre 7,1 m e 43,5 m.

O reservatório geotérmico desenvolve-se numa estreita faixa de orientação N-S, entre os furos de Vinha Brava e São Mateus, apresentando maior temperatura no furo de Posto Santo. A análise geotermométrica revelou a presença de uma anomalia térmica associada a um fluxo ascendente na zona mais a norte, relacionada com a tectónica e com zonas de elevada permeabilidade em materiais vulcânicos. A temperatura do fluido ascendente varia entre 110-120 °C, com enriquecimento em gases vulcânicos, especialmente CO₂. Durante o escoamento subterrâneo, a água arrefece por condução até aproximadamente 20 °C na sua emergência junto ao litoral.

A disponibilidade de calor no reservatório termal diminui progressivamente de norte para sul e do centro para a periferia. O potencial geotérmico do sistema de baixa entalpia de Angra do Heroísmo, calculado pelo método *Heat-In-Place (HIP)* é de aproximadamente de 33 PJ (Petajoule), equivalente a 35 MW. A estimativa do potencial energético, utilizando uma abordagem probabilística combinada com simulações de Monte Carlo assumindo distribuição normal, é de 28,04 MW (P90), 29,45 MW (P50) e 30,86 MW (P10), para uma central geotérmica com 30 anos de vida útil.

Estudos adicionais de prospeção geológica, hidrogeológica, termométrica e geofísica serão essenciais para refinar a estimativa do potencial geotérmico do reservatório de baixa entalpia de Angra do Heroísmo.

Referências

- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J. H., Petty, R. J. (1985). DRASTIC: Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential using Hydrogeologic Settings, Office of Research Development, US EPA: Ada, OK, USA, 622 p.
- Arnósson, S. (1983). Chemical equilibria in Icelandic geothermal systems - Implications for chemical geothermometry investigations. *Geothermics*, 12, 119-128.
- Arnósson, S. (1991). Geochemistry and Geothermal Resources in Iceland. Science Inst. University of Iceland, Reykjavik, 68 p.
- Carvalho, J. M., Carvalho, M. R. (2004). Recursos geotérmicos e seu aproveitamento em Portugal. *Cad. Lab. Xeolóxico de Laxe*, Coruna, 29, 97-117.
- Carvalho, M. R. (1999). Hidrogeologia do Maciço Vulcânico de Água de Pau/Fogo (S. Miguel-Açores). Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa, Lisboa, 445 p.
- Carvalho, M. R. (2003). Estudo de Alternativas de Abastecimento Público aos Concelhos de Angra do Heroísmo e Praia da Vitória (Ilha Terceira, Açores). Projeto Geotérmico da Ilha Terceira. Memória Descritiva e Justificativa, COBA, Lisboa, 73 p.
- Carvalho, M. R., Sá, H., Freitas, A., Nunes, J. C., Carreira, P. M., Marques, J. M., Carvalho, J. M. (2022a). Hydrothermal Basal Aquifer of Angra do Heroísmo (Terceira Island, Azores): Chemical, Isotopic and Hydraulic Characterization. Conference Abstract Book, 3rd International Multidisciplinary Conference on Mineral and Thermal Water, 26-30 June, Caserta, Italy, 61 p.
- Carvalho, M. R., Sá, H., Freitas, A., Nunes, J. C., Carreira, P. M., Marques, J. M., Carvalho, J. M. (2022b). Hydrothermal Basal Aquifer of Angra do Heroísmo (Terceira Island, Azores): Chemical, Isotopic and Hydraulic Characterization, MinWat 2020, 3rd International Multidisciplinary Conference on Mineral and Thermal Waters, Caserta (Italy), June 26th – 30th. Apresentação oral.
- CCDRLVT (2015). Guia metodológico para delimitação da Reserva Ecológica Nacional em Lisboa e Vale do Tejo. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo. Direção de Serviços de Ordenamento do Território, Lisboa, 204 p.
- CEC (2003). Guidance on analysis of pressures and impacts. Guidance Document nº 3. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/CE). European Communities, Luxembourg, 148 p.
- Cruz, J. V., Brito, A. G. (2002). Contribuição da hidrogeologia para o planeamento e a gestão sustentável da água no arquipélago dos Açores. Trabalho apresentado em 10.º ENaSB - SILUBESA, 2002, 15 p.
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702 p.
- DRA (2018). Carta de ocupação do solo da Região Autónoma dos Açores – COS.A/2018. Direção Regional do Ambiente, 83 p.
- DGEG (2017). Geotermia-Energia Renovável em Portugal. Brochura da DGEG, Direção Geral de Energia e Geologia. 1ª Edição, 54 p.
- Decreto de Lei n.º 54/2015, de 22 de junho. Diário da República. 4296-4308. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/lei/54-2015-67552498>.

- DROTRH-INAG (2001). Plano Regional da Água. Relatório Técnico. Direcção Regional do Ordenamento do Território e dos Recursos Hídricos/Secretaria Regional do Ambiente e Instituto da Água. Região Autónoma dos Açores. Versão para consulta pública, 414 p.
- DROTRH (2015). Plano de Gestão de Região Hidrográfica 2016-2021. Volume 3. Terceira. Relatório técnico. Caracterização e diagnóstico da situação de referência, 468 p.
- DROTRH (2021a). Plano de Gestão de Região Hidrográfica (RH9) 2022-2027. Parte 2 - Caracterização da Situação de Referência e Diagnóstico, 224 p.
- DROTRH (2021b). Plano de Gestão de Região Hidrográfica 2022-2027. Volume 3. Terceira. Relatório técnico. Caracterização e diagnóstico da situação de referência, 331 p.
- EDA (2024a). Procura e Oferta de Energia Elétrica. Dezembro/2024. Eletricidade dos Açores, 30 p.
- EDA (2024b). Plano Estratégico Plurianual e Orçamento para 2024. Eletricidade dos Açores, 118 p.
- Epstein, S., Mayeda, T. (1953). Variation of ^{18}O content of waters from natural sources. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 4, 213-224. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(53\)90051-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(53)90051-9)
- Feraud, G., Kaneoka, I., Allegre, C., J. (1980). K/Ar ages and stress pattern in the Azores: geodynamic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 46, 275-286.
- Fink, J., Heim, E., Klitzsch, N. (2022). State of the Art in Deep Geothermal Energy in Europe. Springer, 91 p.
- Flóvez, Ó.G. (2008). Geothermal projects in Iceland. ISOR. <https://www.slideserve.com/axel/geothermal-projects-in-iceland-powerpoint-ppt-presentation>. Consultado a 12 de janeiro de 2024.
- Fouillac, C., Michard, G. (1981). Sodium/lithium ratios in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs. *Geothermics*, 10, 55-70. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(81\)90025-0](https://doi.org/10.1016/0375-6505(81)90025-0)
- Fournier, R. O. (1983). A method of calculating quartz solubilities in aqueous sodium chloride solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 47, 579-586.
- Fournier, R. O. (1991). Water geothermometers applied to geothermal energy. In *Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development*. UNITAR, 37-70.
- Fournier, R. O., Truesdell, A.H. (1973). An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 1255-1275.
- Fournier, R. O., Potter, R.W. (1979). A magnesium correction for the Na-K-Ca geothermometer. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, 1543-1550.
- França, Z., Cruz, J. V., Nunes, J. C., 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 Hidrogeologia, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 533 p.
- Friedman, I. (1953). Deuterium content of natural waters and other substances. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 4, 89-103. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(53\)90066-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(53)90066-0)
- Giggenbach, W. F. (1988). Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, 2749-2765.

- Gupta, H. K., Roy, S. (2007). Geothermal energy: an alternative resource for the 21st century. Elsevier, 279 p.
- Hirn, A., Haessler, H., Trong, P. H., Wittlinger, G., Victor, L. A. M. (1980). Aftershock sequence of the January 1st, 1980 earthquake and present-day tectonics in the Azores. *Geophys. Res. Letters*, 7, 501-504.
- Iceland Drilling (1995). Report for a fresh water well. Posto Santo. Relatório de Sondagem. 1 p.
- IGC (1971). Carta topográfica da Ilha Terceira, Escala 1:200.000. Instituto Geográfico e Cadastral. Lisboa.
- Intertec (1995a). Relatório – Captação de Água Subterrânea. Farrouco – Angra IV – JHF4. Relatório de Sondagem. 3 p.
- Intertec (1995b). Relatório – Captação de Água Subterrânea. Terra Chã – Angra I – JHF1. Relatório de Sondagem. 4 p.
- Intertec (1995c). Relatório – Captação de Água Subterrânea. Vinha Brava – Angra II – JHF4. Relatório de Sondagem. 5 p.
- Kharaka, Y.K., Mariner, R.H. (1989). Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. In Thermal History of Sedimentary Basins Methods and Case Histories. Ed. N.D. Naeser, T.M. McCulloh, 99-117.
- Lidsen (2023). <https://www.lidsen.com/journals/jept/jept-special-issues/geoth-energ-explor-prod>. Consultado a 1 de novembro 2023.
- Lindal, B. (1973). Industrial and other applications of geothermal energy. In. Armstead H. C. H. (ed.), *Geothermal Energy*, Unesco. Paris, 135-148.
- Lloyd, E.F., Collis, S.K. (1981). Geothermal Prospection - Ilha Terceira, Açores. Geological Report, July 1981. Lab. Geoc. e Tecnol. Sec. Reg. de Com. e Ind. Região Autónoma dos Açores, 96 p.
- Michard, G. (1988). Modelling of trace element concentration in geothermal waters from granitic areas. *Chemical Geology*, 70, 154 p.
- Morais, M. (2012). Sistemas hidrominerais nos terrenos graníticos da zona Centro-Ibérica em Portugal central: perspectivas químicas, isotópicas e genéticas sobre as águas sulfúreas. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra, 290 p.
- Nieva, D., Nieva, R. (1987). Developments in Geothermal Energy in Mexico-Part Twelve: A Cationic Geothermometer for Prospecting of Geothermal Resources. *Heat Recovery Systems & CHP*, 7, 243-258. [https://doi.org/10.1016/0890-4332\(87\)90138-4](https://doi.org/10.1016/0890-4332(87)90138-4)
- Nunes, J. C. (1991). Microssismos e neotectónica – Contribuição para o seu estudo nos Açores. Provas Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, DG, UA, Ponta Delgada, 245 p.
- Nunes, J. C. (1999). A actividade vulcânica na ilha do Pico do pliocénico superior ao holocénico: mecanismo eruptivo e hazard vulcânico, Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Geologia, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 357 p.
- Nunes, J. C. (2000). Notas sobre a geologia da Ilha Terceira (Açores), *Açoreana*, 9 (2), Ponta Delgada, 205-215.

- Nunes, J. C. (2004). Geologia. In: Forjaz, V.H. – Atlas Básico dos Açores. Observatório Vulcanológico e Geotérmico dos Açores (Ed). Ponta Delgada, 60-62.
- Nunes, J. C. (2017). Cartografia vulcanoestratigráfica do campo geotérmico do Pico Alto (Ilha Terceira, Açores). *Açoreana*, 11 (1), 59-88.
- Nunes, J. C., Calvert, A., Medeiros, S., Lima, E. A., Pereira, F., Costa, M. P., Barcelos, P., Carvalho, M. R. (2014). Geological mapping of the central area of Terceira Island (Azores, Portugal): associated volcanostratigraphy, ages and genetic implications on the Malha-Balcões-Chamusca lava caves system. *Comunicações Geológicas*, 101, Número Especial I, 283-288. ISSN: 0873-948X; e-ISSN: 1647-581X.
- Nunes, J. C., Carvalho, J. M., Carvalho, M. R. (2016). New geologic insights for the Pico Alto Geothermal Field (Terceira Island, Azores, Portugal) as a key tool for its conceptual modelling. *Proceedings of the “European Geothermal Congress 2016”*. Strasbourg, França. Setembro. Edição Electrónica (CD-ROM), 8 p.
- Nunes, J. C., Coelho, L., Carvalho, J. M., Carvalho, M. R., Garcia, J. (2020). Portugal country update 2020. *Proceedings World Geothermal Congress 2020*. Reykjavik, Iceland, April 26 – May 2, 2020, 12 p.
- Nunes, J. C., Coelho, L., Carvalho, M. R., Carvalho, J. M. (2023). Portugal Country Up-date 2022. *Proceedings World Geothermal Congress 2023*. Beijing, China, April 17 – 21, 2023, 11 p.
- Nunes, J. C., Sá, H., Freitas, A. (2021). Termalismo, turismo de saúde e bem-estar e turismo sénior: contributos para o turismo sustentável nos Açores. In: T. Medeiros et al. (Ed) – Turismo Sénior: Abordagens, Sustentabilidade e Boas Práticas. Capítulo 5. Ponta Delgada, 100-110. ISBN: 978-989-53123-2-0.
- Nunes, J. C., Almeida, V., Ferreira, C., Carvalho, M. R., Sá, H., Medeiros, S. (2024). Angra Hydrothermal Aquifer (Terceira Island, Azores, Portugal): Geological and Morpho-tectonic Constraints. Extended Abstract. *European Geothermal Congress 2025*, Zürich, Switzerland. October. Submitted.
- Nuti, S. (1991). Isotope Techniques in Geothermal Studies. In *Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development*, Ed. Franco D'Amore, UNITAR/UNDP, Rome, 215-252.
- 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. *Geologia de Portugal*, 2, 595-690.
- Parkhurst, D. L., Appelo, C. A. J. (1999). User's Guide to PHREEC (version 2) – A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. *Water-Resources Investigations Report*, 99-4259, 312 p.
- Piris, G., Herms, I., Grier, A., Colomer, M., Arnó, G., Gomez-Rivas, E. (2021). 3DHIP-calculator-A new tool to stochastically assess deep geothermal potential using the heat-in-place method from voxel-based 3D geological models. *Energies*, 14 (21), 7338 p.; <https://doi.org/10.3390/en14217338>
- Piris, G., Herms, I., Grier, A., Gomez-Rivas, E., Colomer, M. (2022). 3DHIP-Calculator. 3D Deep Geothermal Resource Assessment by means of the “Heat In Place” method using Monte Carlo simulations. *Software User Manual v1.2*, 42 p.
- Rodrigues, F. C. (2002). Hidrogeologia da ilha Terceira (Açores – Portugal). Contributo para o seu conhecimento. Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia do Ambiente, Universidade dos Açores, Angra do Heroísmo, 418 p.

Self, S. (1976). The recent volcanology of Terceira, Azores. *Journal of the Geological Society of London*, 132; 645-666.

Self, S. (1982). Excursion Guide for field trip V2. Island of Terceira. *Arquipélago, Série Ciências da Natureza* 3; 329-342.

Sondagens Batalha (2009). Relatório de Execução de 4 Furos de Pesquisa e Captação de Água Subterrânea em Angra do Heroísmo, na Ilha Terceira. Furo S.Mateus – SB4. Relatório de Empresa. 31 p.

Stober, I., Bucher, K. (2021). Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development. Springer Nature. Second Edition, 390 p.

ThinkGeoEnergy (2025). <https://www.thinkgeoenergy.com/geothermal/geothermal-energy-production-utilisation/> . Consultado a 12 de janeiro de 2025.

Tonani, F. B. (1980). Some Remarks on the Application of Geochemical Techniques in Geothermal Exploration. Proceedings of the 2nd International Seminar on the Results of EC Geothermal Energy Research, Strasbourg, 4-6 March 1980, 428-443.

Truesdell, A. H. (1976). Summary of section III, Geochemical Techniques in exploration. Proceedings of the 2nd U.N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, Calif. VI, 53-79.

Veiga, J. M. G. C. (2008). Métodos de Análise das Incertezas na Verificação da Segurança Estrutural em Engenharia Civil. Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Ciências de Engenharia, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 281p.

Zbyszewski, G., Medeiros, A.C., Ferreira, O.V., Assunção, C.T. (1971). Carta Geológica de Portugal na escala de 1:50.000. Notícia explicativa da Ilha Terceira (Açores), Ser. Geol. Portugal, Lisboa, 43 p.

Anexo A

Tabela A.1 - Distribuição de classes de declive e respetivo índice na área em estudo.

Declive (%)	<2	2-6	6-12	12-18	>18
Índice	10	9	5	3	1

Tabela A. 2 - Distribuição de classes de litologia e respetivo índice na área em estudo, adaptado de Aller et al. (1985).

Litologia	Índice
Escoadas lávicas basálticas do Vulcão Guilherme Moniz	2
Escoadas lávicas basálticas da Zona Basáltica Fissural	3
Escoadas traquíticas e depósitos pomíticos do Vulcão Guilherme Moniz	4

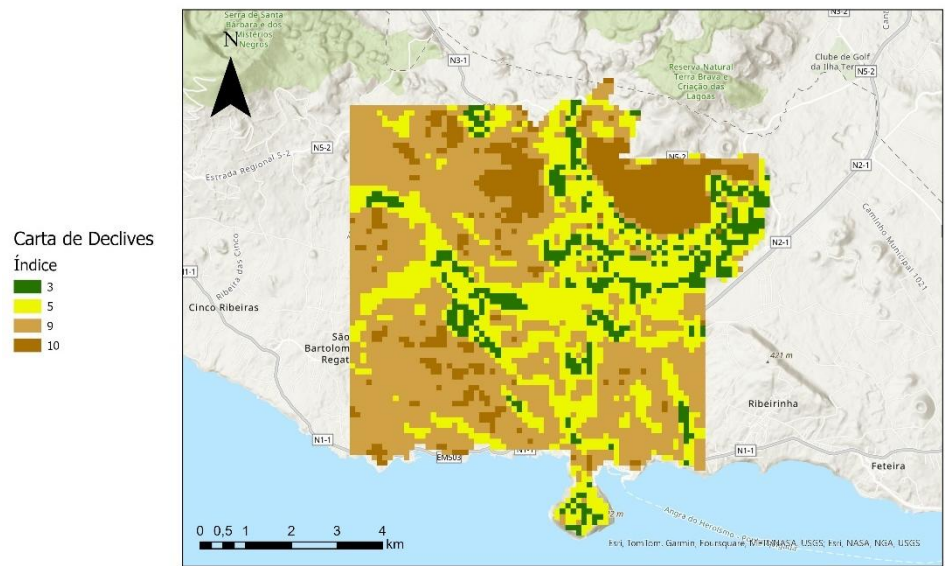


Figura A.1 - Carta de índices das classes de declive, obtidas em SIG através do modelo digital de terreno e do intervalo de declives da Tabela A.1, construída para o cálculo da infiltração na área em estudo.

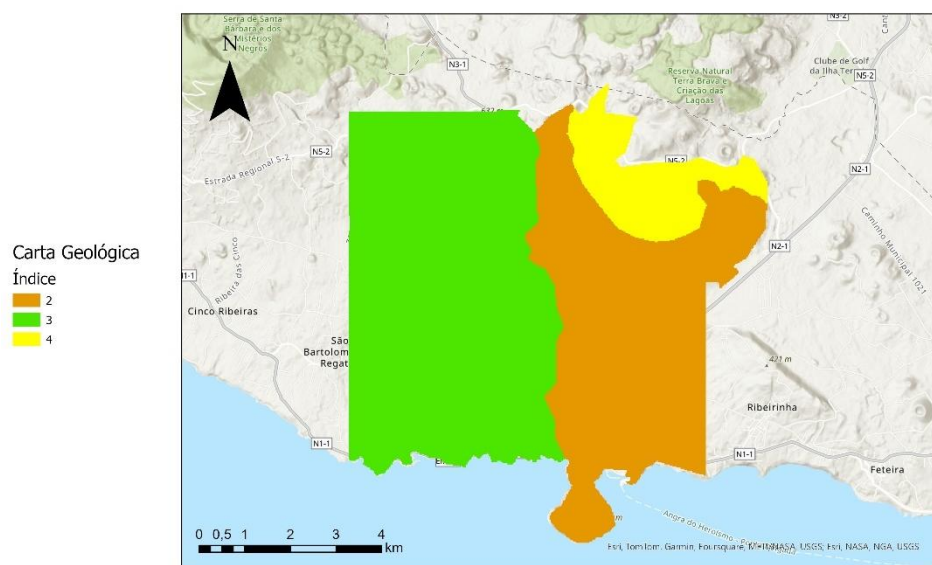


Figura A.2 - Carta de índices das classes de litologia, obtidas em SIG através do modelo digital de terreno e do intervalo de litologias da Tabela A.2, construída para o cálculo da infiltração na área em estudo.

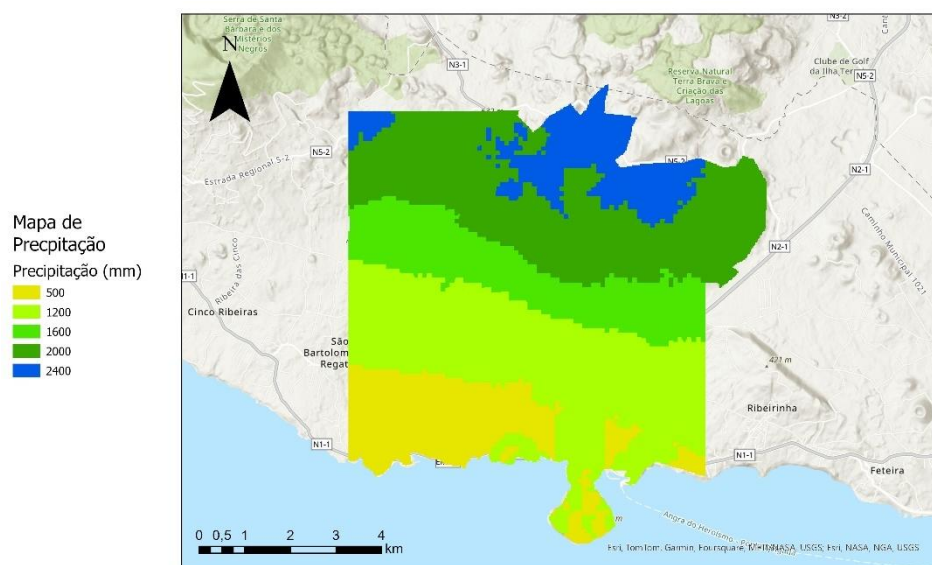


Figura A.3 - Mapa de Precipitação (adaptado de DROTRH, 2021b).

Tabela A.3 - Dados relativos a recarga (DROTRH–INAG,2001).

Massa de água	Precipitação (hm3/ano)	Taxa de Recarga (%)	Recarga potencial (hm3/ano)	Recarga Aquífera (m3/ano)	Descarga Subterrânea(m3/ano)	Reservas (m3/ano)
Biscoitos – Terra Chã	90,86	43,03%	39,10	39101660	>1331155	<37770505
Central	37,15	20,22%	7,51	7510727	>4620170	<2890557
Cald.G.Moniz-S. Sebastião	116,69	48,55%	56,65	56654706	>5178620	<51476086

Tabela A.4 - Dados relativos a recarga (DROTRH, 2015).

Massa de água	Precipitação (hm3/ano)	Taxa de Recarga (%)	Recarga potencial (hm3/ano)
Biscoitos – Terra Chã	90,86	43,03%	39,10
Central	37,15	20,20%	7,50
Cald. G. Moniz – S. Sebastião	116,69	48,60%	56,71

Tabela A.5 - Dados relativos a recarga (DROTRH, 2021).

Massa de água	Precipitação (hm3/ano)	Taxa de Recarga (%)	Recarga potencial (hm3/ano)
Central	43	17,21%	7,40
Caldeira Guilherme moniz	242,36	31,97%	77,48

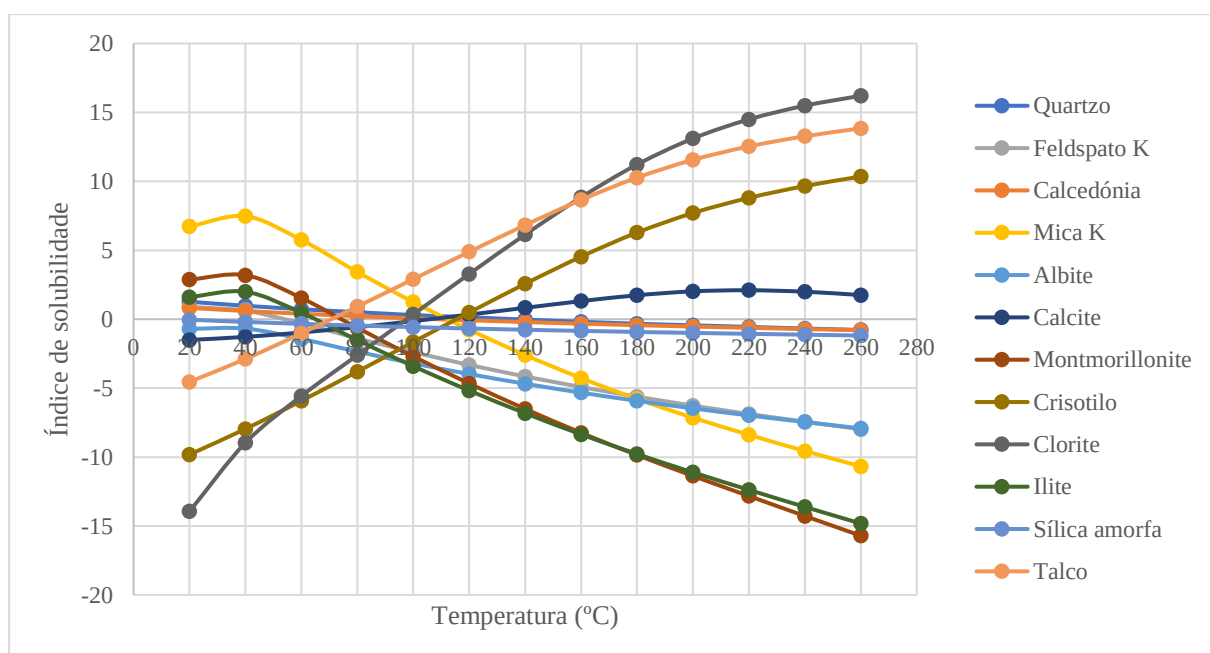


Figura A.4 - Gráfico de Temperatura vs Índice de Saturação do furo de Terra Chã (TC1).

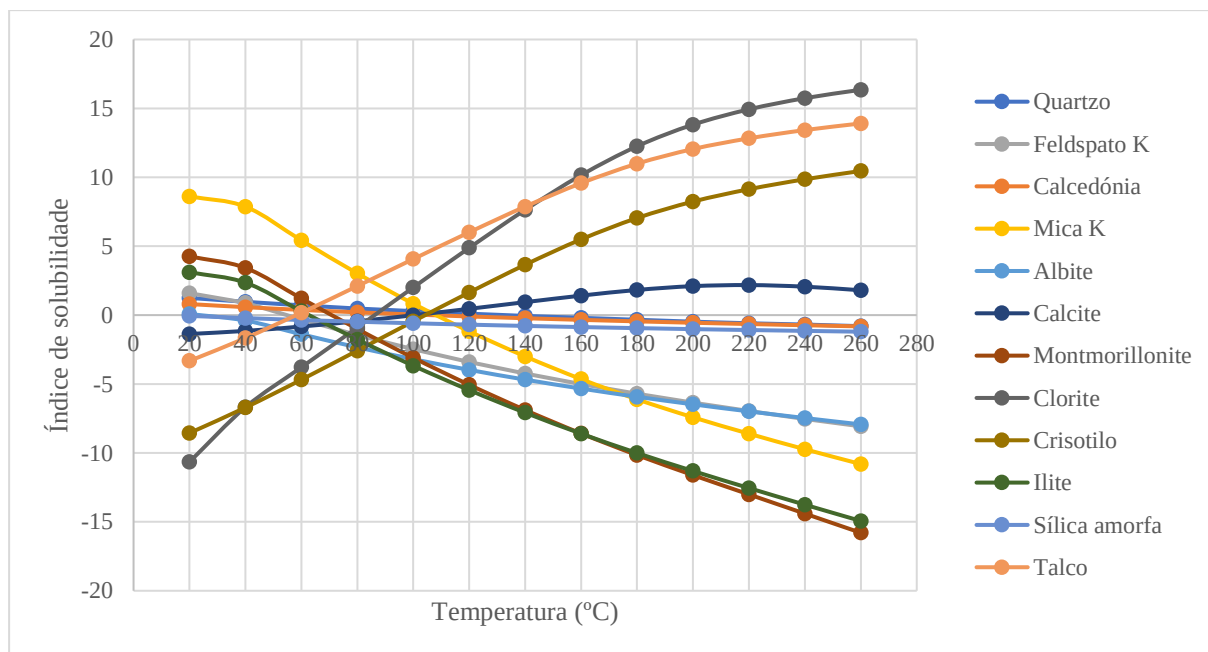


Figura A.5 - Gráfico de Temperatura vs Índice de Saturação do furo de Terra Chã (TC2).

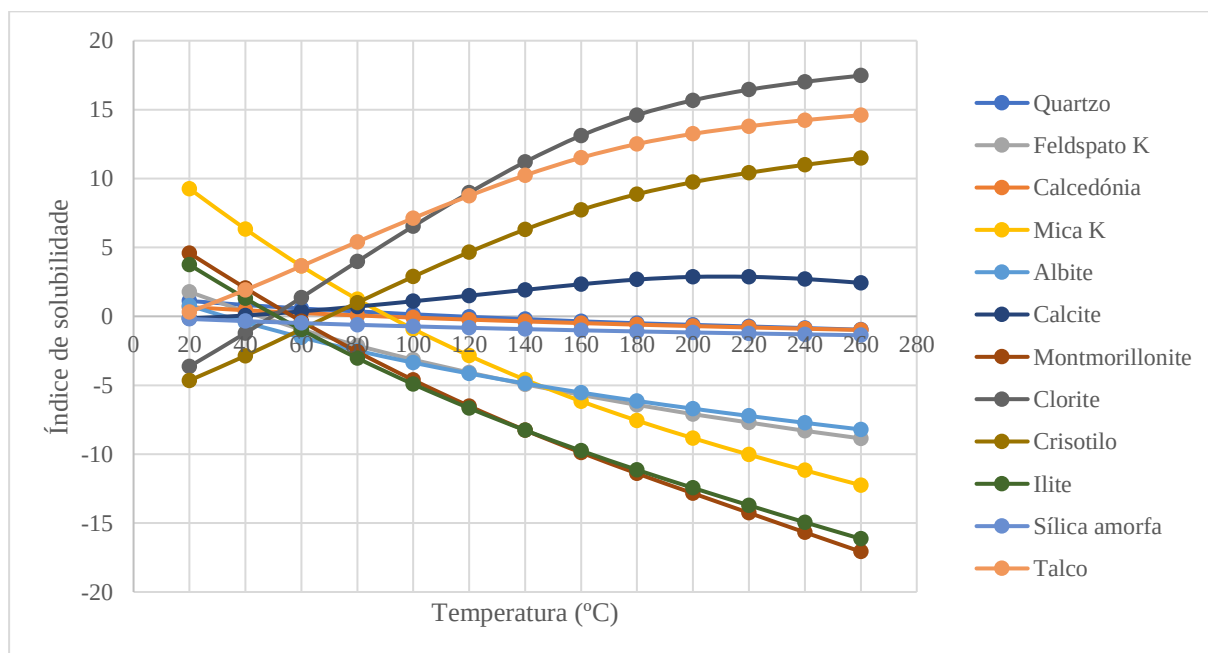


Figura A.6 - Gráfico de Temperatura vs Índice de Saturação do furo do Farrouco (FR).

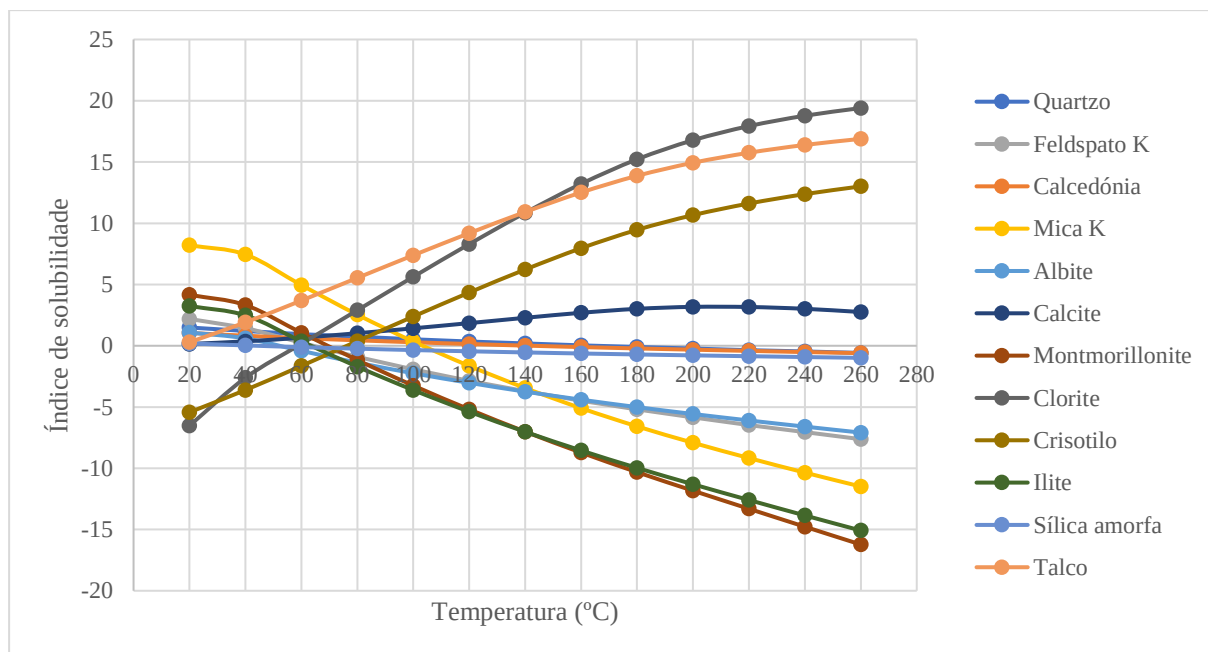


Figura A.7 - Gráfico de Temperatura vs Índice de Saturação do furo de Posto Santo (PS).