

Universidade do Minho
Escola de Ciências

João Pedro Moura Miranda

**Contribuição para o conhecimento
hidrogeológico da Montanha da Penha
(Guimarães, Norte de Portugal)**



Universidade do Minho
Escola de Ciências

João Pedro Moura Miranda

**Contribuição para o conhecimento
hidrogeológico da Montanha da Penha
(Guimarães, Norte de Portugal)**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Geociências- Ramo de Valorização de
Recursos Geológicos

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professora Doutora Isabel Margarida Horta Ribeiro Antunes
Doutor Carlos Alexandre Lopes Rodrigues Ribeiro

Janeiro, 2023

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição
CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de expressar o meu profundo agradecimento a todas as pessoas que, de uma maneira ou de outra, me ajudaram a realizar este trabalho, em particular:

À Professora Doutora Margarida Antunes, agradeço a disponibilidade que sempre demonstrou no esclarecimento de dúvidas, opiniões, críticas e conhecimentos transmitidos no decorrer deste projeto.

Ao Doutor Carlos Ribeiro, agradeço por todo o acompanhamento deste trabalho, pelo esclarecimento de dúvidas, opiniões e conhecimentos transmitidos ao longo desta investigação.

À Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P. agradeço o financiamento de parte desta investigação, através dos projetos de referência UIDB/04683/2020 e UIDP/04683/2020.

Ao Laboratório da Paisagem, agradeço a oportunidade de realizar este trabalho e por todo o apoio prestado, fornecendo-me as condições ideais de trabalho! A toda a equipa do Laboratório da Paisagem, em particular à Ana Pinheira, à Ana Sousa, à Andreia, à Alona, à Beatriz, à Carolina, ao Daniel, ao Gonçalo, ao Guilherme, ao Luís, ao José Carlos, ao Paulo, ao Nuno, ao Pedro, ao Rodrigo, à Rita, à Sara Terroso, à Sara Oliveira, à Susana e ao Senhor Lobo expresso a minha gratidão pelo apoio e auxílio prestado ao longo da realização deste trabalho. Um agradecimento especial à Sara Terroso que, como companheira do gabinete de Paisagem e Território, sempre ouviu alguma dúvidas que fui tendo ao longo do desenvolvimento deste trabalho e agradeço as suas sugestões e pela sua boa disposição que sempre me motivaram! Agradeço à Andreia e ao Nuno pela ajuda prestada na calibração do multi-paramétrico que utilizei nas duas campanhas de campo. Agradeço ainda à Doutora Susana pelas várias oportunidades de participar em ações de educação ambiental, e à Doutora Carolina pela sua leitura e sugestões de melhoria.

À equipa técnica do Laboratório do Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho, em particular à Engenheira Lúcia, pela sua disponibilidade e auxílio no tratamento das amostras de água.

À Vimagua – EIM, S.A., particularmente à Engenheira Sofia e ao Senhor Joaquim, pelos dados cedidos e pela disponibilidade e assistência no trabalho de campo, permitindo o acesso a todas às minas de água subterrânea da Montanha da Penha.

À Irmandade Nossa Senhora da Penha por todo o auxílio e disponibilidade dado no decorrer deste estudo. A todos os meus colegas de mestrado que de alguma forma me auxiliaram na realização deste trabalho! Por fim, agradeço aos meus Pais por terem apostado na minha formação, por sempre me apoiarem e acreditarem em mim. Sem eles nada disto seria possível.

A todos, sem exceção, o meu enorme Obrigado!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

A água é um recurso natural essencial pelo que o seu consumo e a maior procura de água tem registado um elevado aumento com o crescimento da população mundial. A água subterrânea é uma das principais fontes de água potável da Terra, pelo que se não for utilizada de forma correta e sustentável, será difícil assegurar o fornecimento de água em quantidade e qualidade para a humanidade.

A Montanha da Penha constitui um importante e um dos principais reservatórios de água da cidade de Guimarães. É um sistema aquífero fraturado instalado num maciço essencialmente granítico.

Com este trabalho de investigação pretende-se um maior conhecimento hidrogeológico do sistema aquífero e da água subterrânea que circula na região da Montanha da Penha. Para tal, foram selecionadas 40 minas de água deste sistema hídrico de forma a caracterizar a sua variabilidade espacial. Em cada ponto de água subterrânea, foi determinado o caudal e os principais parâmetros físico-químicos “*in situ*”, em dois períodos temporais distintos, representativos do período chuvoso (novembro e dezembro/2021) e do período seco (junho/2022), para avaliar a sua variabilidade temporal. No período seco, foram selecionados 16 pontos de água subterrânea, para determinação dos elementos maiores e traço, bem como, dos isótopos ambientais (^2H e ^{18}O).

O sistema hídrico da Montanha da Penha apresenta um caudal médio de 0.17 L/s, indicando uma produtividade média. A água subterrânea é ligeira a fracamente mineralizada, com valores de condutividade elétrica variando entre 31 e 119 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e um baixo teor de sólidos totais dissolvidos, entre 27.4 e 33.9 ppm, e um valor de pH entre 5.04 e 7.31. Apresenta uma fácies hidroquímica cloretada-sódica, sendo o cloro o anião dominante (Cl: 6.9 a 12.9 mg/L), enquanto o sódio é o catião dominante (Na: 5.4 a 10.0 mg/L). Os resultados obtidos mostram que a água subterrânea da Montanha da Penha cumpre os valores paramétricos definidos para água de consumo humano.

Os isótopos ambientais - ^{18}O e ^2H – obtidos para a água subterrânea sugerem uma origem meteórica predominante para esta água subterrânea, ou seja, tem origem na infiltração da água de precipitação local. Os resultados obtidos sugerem uma recarga de água local e um regime de fluxo pouco profundo, localizado entre 455 e 525 metros de altitude. A proposta de um modelo concetual para este sistema aquífero evidencia que as estruturas geológicas locais, como falhas e fraturas, poderão favorecer a interação água - rocha em profundidade.

Este trabalho constitui um importante contributo para uma melhoria do Plano de Desenvolvimento Sustentável de Guimarães.

Palavras-chave: Hidrogeologia urbana, Hidrogeoquímica, Isótopos ambientais, recarga, sustentabilidade hídrica, Portugal.

Abstract

Water is an essential natural resource, so its consumption and increased demand have increased with the growth of the world population. Groundwater is one of the main sources of drinking water on Earth, so if it is not used correctly and sustainably, it will be difficult to ensure the supply of water in quantity and quality for humanity.

The Penha Mountain is an important and one of the main water reservoirs in the city of Guimarães. It is a fractured aquifer system installed in an essentially granite massif.

With this research work, the aim is to gain greater hydrogeological knowledge of the aquifer system and the groundwater that circulates in the region of Penha Mountain. For this purpose, 40 water mines of this water system were selected in order to characterize its spatial variability. At each groundwater point, the flow rate and the main physical-chemical parameters "in situ" were determined, in two different time periods, representative of the rainy season (November and December/2021) and the dry season (June/2022), to assess its temporal variability. In the dry period, 16 groundwater points were selected to determine major and trace elements, as well as environmental isotopes (^2H e ^{18}O).

The water system of Penha Mountain has an average flow of 0.17 L/s, indicating an average productivity. Groundwater is lightly to weakly mineralized, with electrical conductivity values ranging between 31 and 119 $\mu\text{S}/\text{cm}$, and a low content of total dissolved solids, between 27.4 and 33.9 ppm, and a pH value between 5.04 and 7.31. It presents a hydrochemical chlorinated-sodium facies, with chlorine being the dominant anion (Cl: 6.9 to 12.9 mg/L), while sodium is the dominant cation (Na: 5.4 to 10.0 mg/L). The obtained results show that the underground water of the Penha Mountain complies with the parametric values defined for human consumption water.

The environmental isotopes - ^2H e ^{18}O - obtained for the groundwater suggest a predominant meteoric origin for this groundwater, that is, it originates from the infiltration of local precipitation water. The obtained results suggest a local water recharge and a shallow flow regime, located between 455 and 525 meters of altitude. The proposal of a conceptual model for this aquifer system shows that the local geological structures, such as faults and fractures, may favor the water-rock interaction in depth.

This work constitutes an important contribution to the improvement of the Sustainable Development Plan of Guimarães.

Keywords: Urban hydrogeology, Hydrogeochemistry, Environmental isotopes, recharge, water sustainability, Portugal.

Índice

AGRADECIMENTOS	iii
1. Introdução	1
2. Gestão da Água Subterrânea	3
3. Caraterização da área de Estudo	7
3.1. Enquadramento Histórico	7
3.2. Localização Geográfica	9
3.3. Geologia e Geomorfologia	14
3.4. Hidrografia e Hidrogeologia	18
3.5. Clima	23
3.6. Uso e ocupação do solo	28
3.7. Enquadramento ambiental e sustentável.....	30
4. Classificação de âmbito local da Montanha da Penha a Paisagem Protegida	35
5. Metodologia	42
6. Resultados	51
6.1. Caraterização Hidrodinâmica	51
6.1.1. Caudal das minas de água da Montanha da Penha.....	52
6.2. Caraterização Hidroquímica.....	56
6.2.1. Temperatura	58
6.2.2. pH.....	60
6.2.3. Condutividade elétrica	61
6.2.4. Total de Sólidos Dissolvidos (TDS)	63
6.2.5. Potencial oxidação- redução (ORP/Eh)	66
6.2.7. Componente maioritária.....	69
6.2.7.1. Aniões	70
Cloreto (Cl).....	70
Sulfato (SO_4^{2-})	71
Nitrato (NO_3^-).....	73
Fluoreto (F)	74
6.2.7.2. Catiões.....	75
Sódio (Na^+)	75
Cálcio (Ca^{2+}).....	77
Potássio (K^+)	78

Magnésio (Mg^{2+})	80
Silica	81
6.2.8. Componente vestigiária	82
Estrôncio (Sr^{2+})	83
Ferro (Fe^{2+}).....	83
Manganês (Mn^{2+})	85
Boro (B)	85
Lítio (Li^+)	86
Arsênio (As^-)	86
6.2.9. Qualidade da água para consumo humano.....	87
6.2.10. Fáceis hidroquímicas	87
6.3. Caracterização Isotópica	90
7. Conclusões	96
8.Referências bibliográficas	99
9.Anexos	ii
Anexo 1 - Tabela com os dados climatológicos da estação meteorológica da Penha, no período entre outubro de 2021 e junho de 2022.	iii
Anexo 2 – Tabela com os resultados de caudal (L/s) obtidos durante as campanhas de campo.	iv
Anexo 3 - Tabela com dados de campo obtidos entre novembro e dezembro de 2021.	vi
Anexo 4 - Tabela com dados de campo obtidos em junho de 2022.	viii
Anexo 5 - Tabelas com resultados das análises químicas nas amostras de água recolhidas em junho de 2022.....	x
Anexo 6 - Variação da quantidade de manganês (mg/L) nos pontos de água amostrados.	xi
Anexo 7- Variação da quantidade de boro (mg/L) nos pontos de água amostrados.	xii
Anexo 8- Variação da quantidade de lítio (mg/L) nos pontos de água amostrados.....	xiii
Anexo 9- Tabela com valores paramétricos segundo o Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de agosto e segundo as normas internacionais da OMS.....	xiv
Anexo 10- Tabela com as composições isotópicas de deutério e oxigénio-18 da água subterrânea da Montanha da Penha obtidas na campanha de junho de 2022	xv

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - FASES DE ELABORAÇÃO DOS PGRH (FONTE: PLANOS DE GESTÃO DE REGIÃO HIDROGRÁFICA, 2016).	5
FIGURA 2 - CONDICIONANTES BIOFÍSICAS QUE GERAM O PROCESSO DE CONSTITUIÇÃO DO RESERVATÓRIO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA PENHA (ADAPTADO DE CHOFFAT, 1904).	8
FIGURA 3 - FATORES ESSENCIAIS PARA A CIRCULAÇÃO DA ÁGUA NO SUBSOLO DA PENHA (ADAPTADO DE CHOFFAT, 1904).	9
FIGURA 4 - ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO DO CONCELHO DE GUIMARÃES, NA REGIÃO NORTE DE PORTUGAL.	10
FIGURA 5 - ENQUADRAMENTO DAS FREGUESIAS DO CONCELHO DE GUIMARÃES.	11
FIGURA 6 - ENQUADRAMENTO DA MONTANHA DA PENHA NOS CONCELHOS DE GUIMARÃES E DE FAFE (FERNANDES, 2014).	12
FIGURA 7 - VISTA AÉREA DA MONTANHA DA PENHA (FONTE: HTTPS://WWW.PENHAGUIMARAES.COM/PT/COMPLETO/11).	13
FIGURA 8 - PENEDO FENDIDO JUNTO AO SANTUÁRIO, UM DOS VÁRIOS BLOCOS GRANÍTICOS QUE SE PODE ENCONTRAR NA MONTANHA DA PENHA.	13
FIGURA 9 - UNIDADES MORFOESTRUTURAIS DA PENÍNSULA IBÉRICA E ZONAS DEFINIDAS NO MACIÇO IBÉRICO (PÉREZ-ESTAÚN ET AL., 2004). A REGIÃO DE GUIMARÃES ESTÁ MARCADA A VERMELHO.	14
FIGURA 10 – ESBOÇO DA CARTA GEOLÓGICA DO CONCELHO DE GUIMARÃES. ADAPTADA DAS CARTAS GEOLÓGICAS 5D (BRAGA) E 9B (GUIMARÃES) NA ESCALA 1:50000, PRODUZIDAS PELO LNEG (2000 E 1986).	15
FIGURA 11 – MEGACRISTAIS DE FELDSPATO POTÁSSICO OBSERVÁVEIS NO GRANITO DE GUIMARÃES.	16
FIGURA 12 – GRANITO DE GUIMARÃES, NO QUAL SE OBSERVAM ALGUNS ENCRAVES MÁFICOS (MANCHAS A PRETO) CONJUNTAMENTE COM BIOTITE.	16
FIGURA 13 - GEOLOGIA DA ÁREA ENVOLVENTE DA MONTANHA DA PENHA (ADAPTADO DE FERNANDES ET AL., 2019).	17
FIGURA 14 – GEOFORMA VISÍVEL NA MONTANHA DA PENHA- AGLOMERADO DE BLOCOS GRANÍTICOS ARREDONDADOS OBSERVADOS NO MIRADOURO DO PIO IX.	18
FIGURA 15 – DISTRIBUIÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS E REGIÕES HIDROGRÁFICAS NA ÁREA DE ESTUDO (ADAPTADO DE ATLAS DO AMBIENTE, 2003).	19
FIGURA 16 - CONCELHOS ABRANGIDOS PELA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO AVE (ÀS RISCAS) (ADAPTADO DE ATLAS DO AMBIENTE, 2003).	20
FIGURA 17 - REDE HÍDRICA DA MONTANHA DA PENHA (ADAPTADO DE FERNANDES ET AL., 2019).	21
FIGURA 18 - UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DE PORTUGAL CONTINENTAL (ALMEIDA ET AL., 2000).	22
FIGURA 19 - VALORES MENSIS MÉDIOS DA TEMPERATURA NA MONTANHA DA PENHA ENTRE OUTUBRO DE 2021 E JUNHO DE 2022.	25
FIGURA 20 - VALORES MENSIS MÉDIOS DA PRECIPITAÇÃO NA MONTANHA DA PENHA ENTRE OUTUBRO DE 2021 E JUNHO DE 2022.	26
FIGURA 21 - VALORES MENSIS MÉDIOS DE PRECIPITAÇÃO NO CONCELHO DE GUIMARÃES ENTRE OS ANOS 1980 - 2016.	27
FIGURA 22 - VALORES MENSIS MÉDIOS DA HUMIDADE RELATIVA DO AR NA MONTANHA DA PENHA, ENTRE OUTUBRO DE 2021 E JUNHO DE 2022.	27
FIGURA 23 - OCUPAÇÃO DO SOLO NO CONCELHO DE GUIMARÃES (PLANO DIRETOR MUNICIPAL, 2015).	28
FIGURA 24 - USO E OCUPAÇÃO DE SOLO NO CONCELHO DE GUIMARÃES (FONTE: CÂMARA MUNICIPAL DE GUIMARÃES, 2015).	29
FIGURA 25 – PROCESSO PARTICIPATIVO NO CICLO URBANO DA ÁGUA (ADAPTADO DE WACCLIM, HTTPS://WACCLIM.ORG/ABOUT/)	33
FIGURA 26 - DELIMITAÇÃO DA ÁREA PROPOSTA PARA PAISAGEM PROTEGIDA LOCAL (FONTE: LABORATÓRIO A PAISAGEM).	36
FIGURA 27- GRUTA DO ERMITÃO: A - ENTRADA DA GRUTA; B - INTERIOR DA GRUTA.	37
FIGURA 28- GEODIVERSIDADE OBSERVADA PRÓXIMO DA CAPELA DE S. CRISTOVÃO: À ESQUERDA - PENEDO SUSPENSO; À DIREITA - DESFILADEIRO LABIRÍNTICO.	38
FIGURA 29- PSEUDOESTRATIFICAÇÃO GRANÍTICA.	39
FIGURA 30– “PENEDO QUE ABANA”.	39
FIGURA 31– GEOFORMAS OBSERVADAS NO MIRADOURO DO PIO IX: A - BLOCOS GRANÍTICOS DISPERSOS; B - PIAS GRANÍTICAS (P). .	40
FIGURA 32- BIODIVERSIDADE OBSERVADA NO INTERIOR DAS MINAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA DA MONTANHA DA PENHA; A- RÃ IBÉRICA (RANA IBERICA); B- SALAMANDRA DE PINTAS AMARELAS (SALAMANDRA SALAMANDRA)	40
FIGURA 33- METODOLOGIA DO TRABALHO DESENVOLVIDO.	42
FIGURA 34- LOCALIZAÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE ÁGUA DO SISTEMA HIDROGEOLÓGICO DA MONTANHA DA PENHA.	43
FIGURA 35- EXEMPLO DE GALERIAS POR ONDE A ÁGUA DO SISTEMA DE MINAS DE ÁGUA DA MONTANHA DA PENHA CIRCULA (MINA 4 NA ESQUERDA E MINA 8 NA DIREITA).	44
FIGURA 36 - ESQUEMA DEMONSTRATIVO DE COMO A ÁGUA É TRANSPORTADA ENTRE AS MINAS QUE COMPÕEM ESTE SISTEMA HÍDRICO	44
FIGURA 37- MINAS DE ÁGUA DA PENHA “CAMUFLADAS”, PARECENDO UM ELEMENTO NATURAL DA PAISAGEM DA MONTANHA DA PENHA (EM CIMA); MINAS DE ÁGUA DA PENHA COM UM ASPETO DE “CAPELA” (EM BAIXO).	45
FIGURA 38 - MEDIÇÃO “IN SITU” DOS PARÂMETROS FÍSICO QUÍMICOS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA.	46
FIGURA 39- MEDIÇÃO DO CAUDAL DURANTE A SEGUNDA CAMPANHA DE CAMPO.	46

FIGURA 40- PONTOS DE ÁGUA SELECIONADOS DO SISTEMA HIDROGEOLÓGICO DA MONTANHA DA PENHA PARA ANÁLISE QUÍMICA E ISOTÓPICA.....	47
FIGURA 41- ESQUEMA DO PROCEDIMENTO LABORATORIAL.....	48
FIGURA 42- REPRESENTAÇÃO LABORATORIAL DA DETERMINAÇÃO DA ALCALINIDADE DE UMA AMOSTRA DE ÁGUA.....	48
FIGURA 43- REPRESENTAÇÃO LABORATORIAL DO PROCEDIMENTO EFETUADO NA FILTRAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ÁGUA.....	49
FIGURA 44- DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA APÓS CHEGADA AO RESERVATÓRIO MINAS DA PENHA- SÃO ROQUE PELOS DIFERENTES RESERVATÓRIOS.....	53
FIGURA 45- DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA APÓS CHEGADA AO RESERVATÓRIO MINAS DA PENHA- SÃO ROQUE PELOS DIFERENTES RESERVATÓRIOS.....	54
FIGURA 46- VARIAÇÃO DO CAUDAL NAS MINAS DE ÁGUA DA MONTANHA DA PENHA.....	55
FIGURA 47- VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NAS MINAS DE ÁGUA DA MONTANHA DA PENHA.....	58
FIGURA 48- VARIAÇÃO DO PH NAS MINAS DE ÁGUA DA MONTANHA DA PENHA.....	60
FIGURA 49- VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA NAS MINAS DE ÁGUA DA MONTANHA DA PENHA.....	62
FIGURA 50- VARIAÇÃO DO TOTAL DE SÓLIDOS DISSOLVIDOS NAS MINAS DE ÁGUA DA MONTANHA DA PENHA.....	64
FIGURA 51- VARIAÇÃO ENTRE A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E O TEOR DE TOTAL DE SÓLIDOS DISSOLVIDOS NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DA MONTANHA DA PENHA: A - NOVEMBRO E DEZEMBRO DE 2021; B - JUNHO DE 2022.....	65
FIGURA 52- VARIAÇÃO DO POTENCIAL DE OXIDAÇÃO-REDUÇÃO NA ÁGUA DA MONTANHA DA PENHA.....	67
FIGURA 53- VARIAÇÃO DA ALCALINIDADE (MG/L) NOS PONTOS DE ÁGUA AMOSTRADOS.....	69
FIGURA 54- VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE CLORETO (MG/L) PRESENTE NA ÁGUA DOS PONTOS AMOSTRADOS.....	71
FIGURA 55- VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE SULFATO (MG/L) PRESENTE NA ÁGUA SUBTERRÂNEA OS PONTOS AMOSTRADOS.....	72
FIGURA 56- VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE NITRATO (MG/L) NA ÁGUA.....	73
FIGURA 57- VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE FLUORETO (MG/L) PRESENTE NOS PONTOS AMOSTRADOS.....	74
FIGURA 58- VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE SÓDIO (MG/L) NOS PONTOS DE ÁGUA AMOSTRADOS.....	75
FIGURA 59- PROJEÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO DIAGRAMA DE WILCOX.....	77
FIGURA 60- VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE CÁLCIO (MG/L) NOS PONTOS DE ÁGUA AMOSTRADOS.....	78
FIGURA 61- VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE POTÁSSIO (MG/L) NOS PONTOS DE ÁGUA AMOSTRADOS.....	79
FIGURA 62- VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE MAGNÉSIO (MG/L) NOS PONTOS DE ÁGUA AMOSTRADOS.....	80
FIGURA 63- DIAGRAMA DE DISPERSÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MAGNÉSIO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CÁLCIO.....	81
FIGURA 64- VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE SÍLICA (MG/L) NOS PONTOS DE ÁGUA AMOSTRADOS.....	82
FIGURA 65- VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE ESTRÔNCIO (MG/L) NA ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	83
FIGURA 66- VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DO IÃO FERROSO (MG/L) PRESENTE NOS PONTOS AMOSTRADOS.....	84
FIGURA 67- CLASSIFICAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO DIAGRAMA DE PIPER, PARA A CAMPANHA DE CAMPO DE JUNHO DE 2022..	88
FIGURA 68- PROJEÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO DIAGRAMA DE STIFF.....	89
FIGURA 69- PROCESSO DE FRACIONAMENTO DE RAYLEIGH (UWPCC, 2022).....	91
FIGURA 70- DIAGRAMA DE DISPERSÃO PARA A COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA DE $\Delta^2\text{H}$ EM FUNÇÃO DE $\Delta^{18}\text{O}$ NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DA MONTANHA DA PENHA. PROJETO-SE AINDA A RETA METEÓRICA GLOBAL ($\Delta^2\text{H} = 8.13 \Delta^{18}\text{O} + 10.8$) E A RETA METEÓRICA REGIONAL DO SETOR NOROESTE DA PENÍNSULA IBÉRICA (OLIVEIRA & LIMA, 2007).....	93
FIGURA 71- ESQUEMAS DEMONSTRATIVOS DOS VÁRIOS PROCESSOS QUE PODEM PROVOCAR DESVIO NOS VALORES $\Delta^{18}\text{O}$ E Δ^2 : A – EM RELAÇÃO À RETA DAS ÁGUAS METEÓRICAS MUNDIAIS (LOCAL MWL – RETA DAS ÁGUAS DE PRECIPITAÇÃO MEDITERRÂNEA; GLOBAL MWL – RETA DAS ÁGUAS METEÓRICAS MUNDIAIS; ADAPTADO DE GEYTH (2000) IN: MARQUES ET AL. (2012); B - EM RELAÇÃO À GMWL QUE OCORRE NAS ÁGUAS DA ÁREA EM ESTUDO, EM QUE OCORRE UMA LIGEIRA EVAPORAÇÃO COM FRACIONAMENTO ISOTÓPICO (GUERRA, 2015).....	93
FIGURA 72- DIAGRAMA DE DISPERSÃO DA ALTITUDE EM FUNÇÃO DE $\Delta^{18}\text{O}$ OBTIDO NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DA MONTANHA DA PENHA.....	94
FIGURA 73- MODELO CONCEITUAL DE FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DA MONTANHA DA PENHA. AS LINHAS A TRACEJADO REPRESENTAM TRAJETOS HIPOTÉTICOS NO SUBSOLO E TÊM APENAS PROPÓSITOS ILUSTRATIVOS. O MODELO DE SUPERFÍCIE 3D FOI CRIADO USANDO O PLUGIN QGIS “QGIS2THREEJS”.....	95

Índice de tabelas

TABELA 1- PERCENTAGEM DE ÁGUA QUE CADA RESERVATÓRIO FOTNRCE ÀS FREGUESIAS DE GUIMARÃES.....	52
TABELA 2 - DADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DO CAUDAL (L/S) DOS PONTOS AMOSTRADOS.	55
TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO DAS CAPTAÇÕES SEGUNDO O VALOR MÉDIO DO CAUDAL OBTIDO (MEINZER IN TODD, 1980).....	56
TABELA 4 - DADOS ESTATÍSTICOS PARA OS VALORES DE TEMPERATURA DA ÁGUA (°C) DOS PONTOS AMOSTRADOS.	59
TABELA 5 - CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS QUANTO À TEMPERATURA SEGUNDO PULIDO CARRILLO (1978).	59
TABELA 6 - DADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DO PH DOS PONTOS AMOSTRADOS.....	61
TABELA 7 - DADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DOS PONTOS AMOSTRADOS.	62
TABELA 8 - CLASSIFICAÇÃO DA MINERALIZAÇÃO DA ÁGUA (ADAPTADO DE MENDES & OLIVEIRA, 2004).	63
TABELA 9 - DADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DO TOTAL DE SÓLIDOS DISSOLVIDOS NOS PONTOS DE ÁGUA AMOSTRADOS.	64
TABELA 10 - CLASSIFICAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA (ADAPTADO DE DAVIS E DE WIEST (1966) E FREEZE E CHERRY (1979)).	66
TABELA 11 - DADOS ESTATÍSTICOS OBTIDOS PARA OS VALORES DE POTENCIAL OXIDAÇÃO-REDUÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA.	68
TABELA 12 - DADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DA ALCALINIDADE (MG/L) DOS PONTOS AMOSTRADOS.	69
TABELA 13 - DADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DE CLORETO (MG/L) DOS PONTOS AMOSTRADOS.	71
TABELA 14 - DADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DE SULFATO (MG/L) DOS PONTOS AMOSTRADOS.....	72
TABELA 15 - DADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DE NITRATO (MG/L) DOS PONTOS AMOSTRADOS.....	73
TABELA 16 - DADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DE FLUORETO (MG/L) DOS PONTOS AMOSTRADOS.....	75
TABELA 17 - DADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DE SÓDIO (MG/L) DOS PONTOS AMOSTRADOS.	76
TABELA 18 - DADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DE CÁLCIO (MG/L) NA ÁGUA DOS PONTOS AMOSTRADOS.	78
TABELA 19 - DADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DE POTÁSSIO (MG/L) DOS PONTOS AMOSTRADOS.....	79
TABELA 20 - DADOS ESTATÍSTICOS DAS QUANTIDADES DE MAGNÉSIO (MG/L) DOS PONTOS DE ÁGUA AMOSTRADOS.	81
TABELA 21 - DADOS ESTATÍSTICOS DAS QUANTIDADES DE SÍLICA (MG/L) NOS PONTOS DE ÁGUA AMOSTRADOS.....	82
TABELA 22 - DADOS ESTATÍSTICOS PARA AS ANÁLISES ISOTÓPICAS DE $\Delta^2\text{H}$ E $\Delta^{18}\text{O}$ NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DA MONTANHA DA PENHA.	92

Lista de abreviaturas

RNAP - Rede Nacional de Áreas Protegidas

DQA - Diretiva Quadro da Água

PGRH - Plano de Gestão de Região Hidrográfica

ZGTM - Zona Galiza Trás-os-Montes

ZCI - Zona Centro Ibérica

UF - União de Freguesias

PDM - Plano Diretor Municipal

EEM - Estrutura Ecológica Municipal

LdP - Laboratório da Paisagem

GMWL - Reta de Água Meteórica Global

RMWL - Reta de Água Meteórica Regional

LMWL - Reta de Água Meteórica Local

V-SMOW - Viena- Standar Mean Ocean Water

IAEA - Agência Internacional de Energia Atómica

1. Introdução

A água é essencial para a sobrevivência da humanidade, e as exigências de exploração deste recurso aumentam proporcionalmente com o crescimento populacional. Muitas pessoas, vivem em lugares sem água potável, fundamental para a sobrevivência, com a sua prosperidade a depender da disponibilidade de água segura e acessível. Se a água subterrânea, a maior e mais segura fonte de água potável da Terra, não for usada, será difícil sustentar o fornecimento de água de qualidade para consumo humano, industrial e para a agricultura. A maior parte da água potável em muitas regiões do Globo está alojada no subsolo e nos reservatórios subterrâneos, até 80% na Europa e na Rússia, e muito mais no norte de África e no Médio Oriente (Struckmeier *et al.*, 2007).

Para qualquer região ou país, a água subterrânea é uma reserva de água inestimável. O seu conhecimento e investigação abrange uma variedade de áreas científicas, tecnológicas, económicas e sociais, vitais para a utilização e exploração sustentável do recurso, levando em consideração a sua manutenção e proteção sob uma perspetiva contemporânea de gestão integrada da água (Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 2022). O planeamento, proteção e gestão da água subterrânea depende do conhecimento das características do sistema aquífero e das características hidroquímicas da água. A química da água subterrânea é influenciada por um conjunto de variáveis, incluindo o enquadramento hidrogeológico, o grau com que diferentes tipos de rochas sofreram intemperismo químico, qualidade da recarga da água, e insumos de outras fontes que não a interação água-rocha (Antunes & Gonçalves, 2019).

Os sistemas de distribuição de água em Portugal são centralizados, mostrando que são mais suscetíveis à escassez hídrica. Deste modo, é necessário expandir as fontes descentralizadas, localizadas dentro da cidade ou em zonas periféricas (e.g. água reciclada, água da chuva, água dessalinizada e, principalmente, água subterrânea). É necessário e fundamental gerir os recursos hídricos de uma forma holística, com a qualidade ajustada às diversas necessidades e utilizações, bem como proteger e valorizar os sistemas descentralizados. Da mesma forma, é fundamental construir uma drenagem urbana mais sustentável, que considere medidas de controlo de inundações e cheias, incluindo a proteção dos ecossistemas e os benefícios que estes proporcionam nas bacias hidrográficas (Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 2022).

Com este trabalho pretendeu-se realizar um estudo hidrogeológico detalhado de uma área que apresenta um sistema de minas de água subterrânea - as minas de água da Penha, localizado na Montanha da Penha, no concelho de Guimarães, zona norte de Portugal Continental. Assim, pretendeu-se efetuar uma caracterização climatológica, geológica e hidrogeológica detalhada desta região, bem como, a

inventariação, localização e caracterização físico-química da água subterrânea destas minas. Pretendeu-se, ainda, avaliar a produtividade aquífera e potencialidades hídricas, tendo em consideração o importante contributo da ocorrência destas captações de água subterrânea para o abastecimento público no município de Guimarães; constituindo um importante contributo para o Plano de Ação para o Desenvolvimento Sustentável de Guimarães numa gestão adequada dos recursos hídricos subterrâneos. Pretende-se, também, uma valorização da área da Montanha da Penha, abordando a futura classificação da Montanha da Penha como Paisagem Protegida de âmbito local e a sua possível integração na Rede Nacional de Áreas Protegidas (RNAP) que está em curso, com um maior conhecimento e valorização do património geológico que esta área representa.

O trabalho foi desenvolvido em parceria com o Laboratório da Paisagem, localizado em Guimarães. Esta instituição atua em dois pilares fundamentais: a Educação e Sensibilização Ambiental, com o objetivo de alterar hábitos e comportamentos dos cidadãos, contribuindo para o desenvolvimento sustentável; e a Investigação, Desenvolvimento e Inovação (I&D+i), com aplicação no território, dirigida a quatro áreas do conhecimento: Natureza e Biodiversidade, Recursos hídricos, Paisagem e Território e Economia Circular.

2. Gestão da Água Subterrânea

A água subterrânea é um recurso que representa cerca de 37% de toda a água não oceânica do planeta (Trenberth *et al.*, 2007). Dado que representa um vasto reservatório, os hidrogeólogos referem-se a lagos, rios e ribeiros como "*afloramentos de água subterrânea*" para enfatizar a interconexão entre a litosfera e a hidrosfera (Beckie, 2013).

Este recurso geológico contribui mundialmente com cerca de 20% da água potável para a população. Apesar de esta proporção ser relativamente pequena, o seu papel é importante principalmente por duas razões: por um lado, a água subterrânea é adequada para o abastecimento de água potável devido à sua elevada qualidade e, por outro lado, constitui um importante reservatório de armazenamento a longo prazo (Kinzelbach *et al.*, 2003).

Trata-se de um recurso vulnerável, pelo que à medida que os esquemas são desenvolvidos para bombear grandes quantidades de água, e com o potencial aparecimento de contaminantes, em particular persistentes, este recurso precisa ser gerido e protegido de forma adequada e eficaz. A maior parte da contaminação da água subterrânea ocorre a partir da superfície da terra e corresponde a uma fonte de contaminação pontual. O tipo de poluente, o ambiente geológico e as vias de exposição influenciam o risco causado pela poluição, bem como o custo e a eficácia das medidas de remediação. Em muitos casos, a causa da contaminação não pode ser eliminada nos níveis desejados e a um custo razoável (Brown, 2013, citado em Beckie, 2013).

Apesar do papel fundamental no apoio aos ecossistemas e no fornecimento de água, a água subterrânea permanece mal compreendida e, portanto, mal gerida em muitas regiões do mundo, com consequências que podem ser graves, e até mesmo irreversíveis (Smith *et al.*, 2016).

Assim, para garantir a qualidade da água captada e uma gestão adequada da exploração do aquífero, é necessário proceder ao conhecimento hidrogeológico do sistema aquífero em questão, sendo fundamental que estes estudos estabeleçam, desde o início da atividade de exploração, um modelo de funcionamento do sistema aquífero, no qual se possa basear uma gestão adequada da exploração onde se evitem situações de sobre-exploração e de risco de contaminação da água subterrânea, face ao grau de vulnerabilidade do aquífero e dos potenciais focos de contaminação (Graça, 2002).

A gestão da água subterrânea desenvolve-se em princípios como a equidade e eficiência na atribuição dos recursos hídricos, seja nos seus serviços como na sua distribuição. É considerada, também, a necessidade de técnicas de gestão integrada e de gestão hídrica em bacias hidrográficas, bem como, a necessidade de equilibrar o consumo de água entre a atividade socioeconómica e o meio ambiente. Além

disso, a gestão de água trata da formulação, estabelecimento e implementação de políticas de recursos hídricos, com base na legislação e nas instituições vigorantes (Conicelli & Hirata 2016).

Os sistemas de água subterrânea variam e respondem de maneiras diferentes às pressões, ou seja, exigem diferentes soluções de gestão. O desenvolvimento de uma compreensão técnica sobre como funcionam os sistemas de água subterrânea, envolve por exemplo, o conhecimento do tipo de rocha que resulta num “bom aquífero”, conhecer as propriedades de alguns aquíferos, qual o tipo de recarga e origem da água, determinação da quantidade de água que pode ser armazenada de forma sustentável, e reconhecer os principais tipos de aquíferos com maior risco de poluição (Smith *et al.*, 2016).

Considera-se um “*bom aquífero*” uma formação geológica que apresente duas características fundamentais: **porosidade e permeabilidade**. A porosidade define-se pelos espaços vazios existentes entre a matéria sólida dos materiais geológicos, enquanto a permeabilidade é a capacidade com que uma rocha se deixa atravessar pela água (Struckmeier *et al.*, 2007).

Na legislação Portuguesa, a Diretiva Quadro da Água (DQA) define a água subterrânea como “*todas as águas que se encontram abaixo da superfície do solo, na zona de saturação e em contacto direto com o solo ou com o subsolo*”, sendo o Estado das Águas Subterrâneas “*a expressão global do estado em que se encontra uma determinada massa de águas subterrâneas, definido em função do pior dos dois estados, quantitativo ou químico, dessas águas*”. Define ainda o “Bom estado das Águas Subterrâneas” como “*o estado em que se encontra uma massa de Águas Subterrâneas quando os seus estados quantitativos e químico são considerados, pelo menos, como bons*” (Comissão Europeia, 2000).

O objetivo desta Diretiva é estabelecer um enquadramento para a proteção das águas de superfície interiores, das águas de transição, das águas costeiras e das águas subterrâneas que:

- a) Evite a continuação da degradação e proteja e melhore o estado dos ecossistemas aquáticos, e também dos ecossistemas terrestres e zonas húmidas diretamente dependentes dos ecossistemas aquáticos, no que respeita às suas necessidades em água;
- b) Promova um consumo de água sustentável, baseado numa proteção a longo prazo dos recursos hídricos disponíveis;
- c) Vise uma proteção reforçada e um melhoramento do ambiente aquático, nomeadamente através de medidas específicas para a redução gradual das descargas, das emissões e perdas de substâncias prioritárias e da cessação ou eliminação por fases de descargas, emissões e perdas dessas substâncias prioritárias;
- d) Assegure a redução gradual da poluição das águas subterrâneas e evite a agravação da sua poluição;

e) Contribua para mitigar os efeitos das inundações e secas.

Esta Diretiva pretende ainda assegurar o fornecimento em quantidade suficiente de água superficial e subterrânea de boa qualidade, conforme necessário para uma utilização sustentável, equilibrada e equitativa da água; que se adotem medidas capazes de reduzir significativamente a poluição da água subterrânea e que se protejam as águas marinhas e territoriais.

As medidas destinadas a inverter a tendência serão aplicadas em conformidade com os n.ºs 2, 4 e 5 do artigo 17.º, tendo em conta as normas aplicáveis estabelecidas na legislação comunitária pertinente, sob reserva de aplicação dos n.ºs 6 e 7 e sem prejuízo do disposto no n.º 8 (Comissão Europeia, 2000).

Para se garantir uma boa gestão integrada da água subterrânea e da água superficial são elaborados **Planos de Gestão de Região Hidrográfica (PGRH)**. Estes Planos são instrumentos que validam a gestão, a proteção e a valorização ambiental, social e económica das águas ao nível da região hidrográfica, conciliando as suas utilizações com as suas disponibilidades. Estabelecem métricas com o intuito de atingir os objetivos previstos na Lei da Água, para a gestão da água superficial (interiores, de transição e costeiras) e da água subterrânea (Planos de Gestão de Região Hidrográfica, 2016).

Os PGRH são elaborados por **ciclos de planeamento** (Figura 1), sendo revistos e atualizados de **seis em seis anos** e contêm diversas matérias que se agrupam em cinco grandes áreas temáticas:

- Massas de água (superficial e subterrânea);
- Objetivos ambientais;
- Programa de Medidas;
- Análise Económica;
- Participação Pública (Planos de Gestão de Região Hidrográfica, 2016).

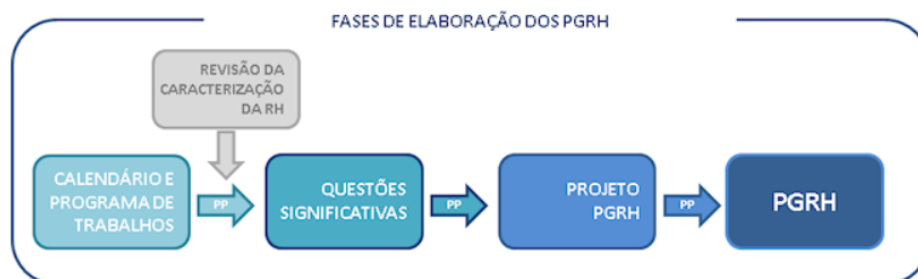


Figura 1 - Fases de elaboração dos PGRH (Fonte: Planos de Gestão de Região Hidrográfica, 2016).

Os PGRH são desenvolvidos de acordo com o estabelecido na [Lei da Água](#) e do [Despacho n.º 11955/2018](#), 2.ª série, de 12 de dezembro.

Em Guimarães, a empresa responsável pelas captações de água que existem no concelho é a Vimágua – EIM, S.A, que utiliza como fontes de água para consumo humano, as captações superficiais e subterrâneas. Quatro destas captações são subterrâneas: minas da Penha, mina da Senhora dos Montes, mina da Rocha e mina de Castelões. As minas da Penha representam 7% do total de água captada (Mendes *et al.*, 2014).

3. Caracterização da área de Estudo

A Montanha da Penha é o “*pulmão verde*” da cidade de Guimarães, impressionando pela sua beleza e harmonia (www.penhaguimaraes.com). Situa-se no concelho de Guimarães, a cerca de 7 km do seu centro histórico, sendo um local onde se encontra reunido um conjunto de fatores de natureza faunística, florística, geológica, paisagística, histórica, cultural e religiosa que tornam este local num espaço único. Este capítulo pretende enquadrar a região de estudo no concelho de Guimarães, e a caracterização detalhada da área da Montanha da Penha. Assim, nos subcapítulos que se seguem apresenta-se uma caracterização dos diferentes aspetos biofísicos, ambientais e históricos da região da Montanha da Penha, necessários para um maior conhecimento e compreensão da área de estudo.

3.1. Enquadramento Histórico

A história do Concelho de Guimarães está profundamente associada ao estabelecimento da pátria Portuguesa e da língua Portuguesa, no século XII. O património que esta cidade apresenta reflete a evolução de alguns edifícios particulares desde os tempos medievais até ao presente. Em 2001, o Centro Histórico foi classificado como Património Mundial da UNESCO (www.unesco.pt).

A Montanha da Penha é um local que apresenta uma imensa beleza paisagística, enriquecida pelo contraste de cores, o cinzento do granito e o verde da vegetação. O Santuário, construído no topo da Montanha, é bastante frequentado, bem como as várias capelas que existem na área. Do ponto de vista lúdico e turístico, a Penha exhibe grandes potencialidades, caracterizando-se pela predominância das atividades e equipamentos ligados ao desporto, ao lazer e ao turismo religioso (www.penhaguimaraes.com).

A Montanha da Penha está ocupada desde o Paleolítico, quando o Homem usava as grutas como abrigo. O interesse em apreciar os princípios religiosos da Penha cresceu na segunda metade do século XIX. Assim, em 1872 vários devotos da Nossa Senhora da Penha juntaram-se com o intuito de criar a Irmandade da Nossa Senhora do Carmo da Penha e, no dia 21 de julho de 1872, são oficialmente aprovados os estatutos da Irmandade, tendo sido, em 1923, classificada como estância de Turismo (Pinto & Barroso, 2005).

Atualmente, a Irmandade de Nossa Senhora do Carmo da Penha é proprietária de cerca de 60 hectares desta área e tem desempenhado um papel muito importante na valorização da ocupação e melhor aproveitamento da Montanha da Penha (Fernandes, 2014).

Em termos hidrogeológicos, a exploração e utilização de água de nascente na Montanha da Penha, para abastecimento do município de Guimarães ocorreu no final do século XVI. O consumo de água aumentou

em particular no século XIX, com o crescimento da população urbana de Guimarães, e consequente sobrecarga das antigas infraestruturas de abastecimento público da cidade. Perante esta circunstância, várias propostas de concessão exclusiva de abastecimento de água foram apresentadas ao executivo municipal de Guimarães (Costa, 2007).

A Câmara Municipal de Guimarães, determinada em avançar com o projeto de exploração e fornecimento de água potável para o abastecimento da cidade, solicitou ao geólogo Paul Choffat, a elaboração de um relatório sobre a viabilidade da exploração de novas fontes de abastecimento de água, a partir das nascentes da Penha (Neves *et al.*, 2007).

As características geológicas da região, combinadas com a elevada precipitação e a permeabilidade do solo, são as principais fontes de recarga nas captações de água subterrânea da Montanha da Penha (Costa, 2007; Figura 2).

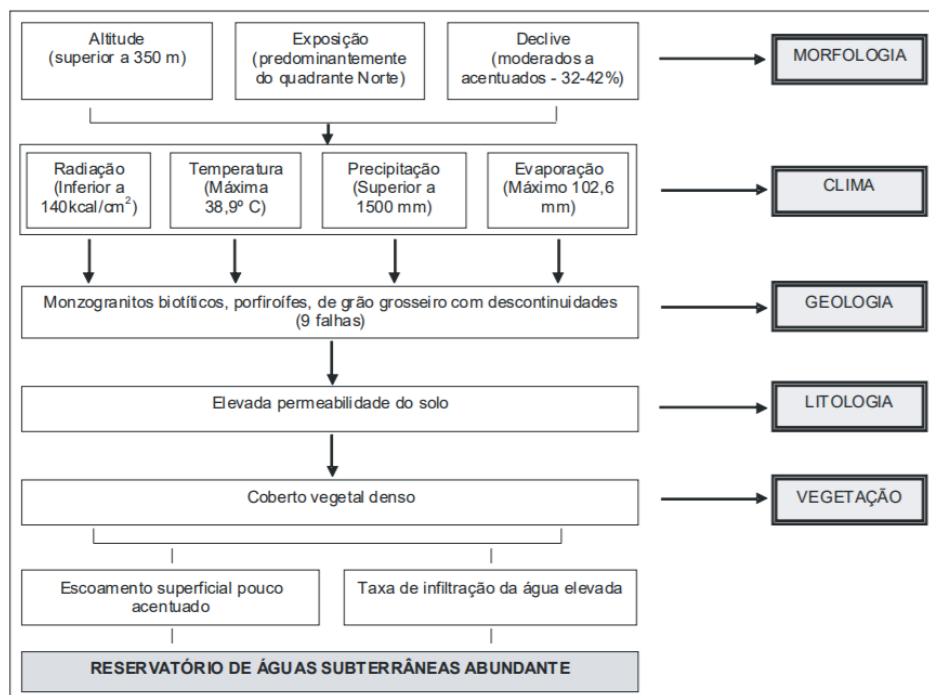


Figura 2 - Condicionantes biofísicas que geram o processo de constituição do reservatório de águas subterrâneas da Penha (adaptado de Choffat, 1904).

Relativamente à circulação da água no subsolo, Choffat (1904) considera a presença de quatro fatores essenciais: geologia, clima, pedologia e morfologia (Figura 3).

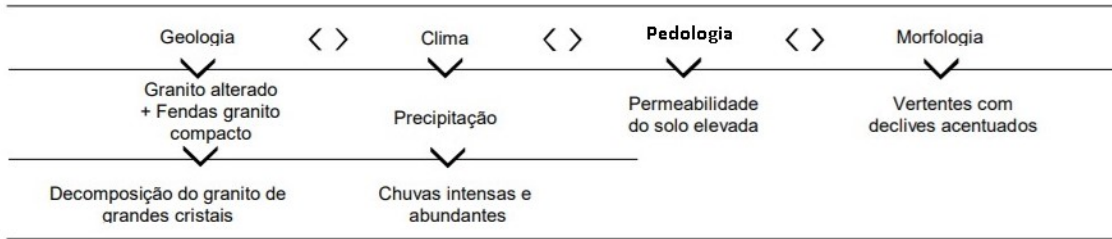


Figura 3 - Fatores essenciais para a circulação da água no subsolo da Penha (adaptado de Choffat, 1904).

A Montanha da Penha tem vindo a ser considerada como o principal reservatório de água subterrânea da cidade, com um conjunto de minas, localizadas nas vertentes, as quais contribuem, ainda hoje, para o abastecimento público de Guimarães (Costa, 2007).

Nos dias de hoje, a Cidade de Guimarães é abastecida essencialmente por água canalizada e da responsabilidade da Vimágua EIM, SA, a qual mantém em funcionamento o sistema de minas da Penha, composto por 40 minas de água que se distribuem pela Montanha da Penha, cuja água se mantém:

“ Todas as águas da Penha, colhidas n´o Monte, ou n´a cidade são chimicamente puras; não contêm matéria orgânica doseavel; os nitratos ou não existem, ou simplesmente vestígios. Também a quantidade d´oxygenio dissolvido é maior do que em qualquer das águas de fontes e poços, no que contribui para o maior valor das águas da Penha” (Lepierre, 1900).

3.2. Localização Geográfica

A Montanha da Penha localiza-se maioritariamente no concelho de Guimarães e, com uma pequena área, no concelho de Fafe. O concelho de Guimarães localiza-se na região noroeste de Portugal, insere-se nas regiões administrativas da Região Norte (NUT II) e do Ave (NUTs III), no distrito de Braga (Figura 4).

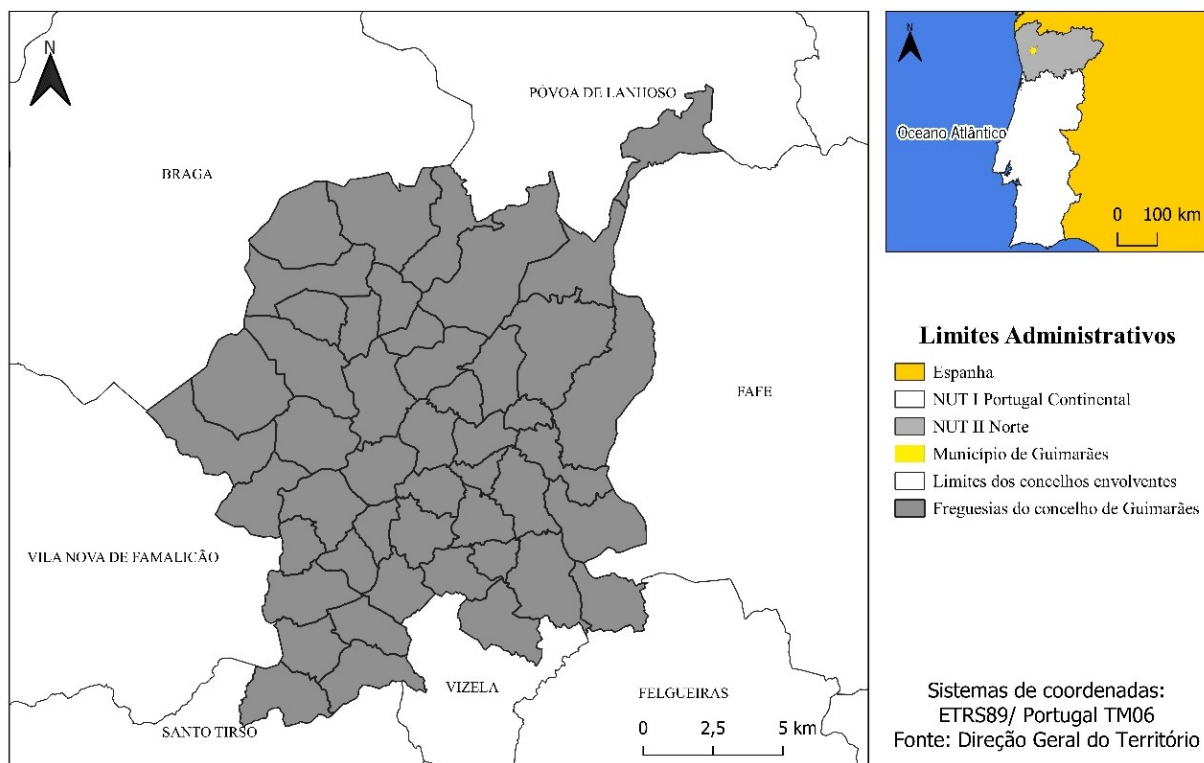


Figura 4 - Enquadramento geográfico do concelho de Guimarães, na região norte de Portugal.

Fonte: Direção Geral do Território, 2019.

O concelho de Guimarães é limitado a norte e noroeste pelos concelhos da Póvoa de Lanhoso e de Braga, respetivamente, a sudoeste pelo concelho de Santo Tirso, a sul e sudoeste por Felgueiras e Vizela, a este com o concelho de Fafe e a oeste por Vila Nova de Famalicão (Figura 5). Possui uma área de aproximadamente de 241 km², incluindo 48 freguesias (Anuário Estatístico da Região Norte, 2018; Figura 5) e uma população residente de 156 852 habitantes (Censos, 2021).

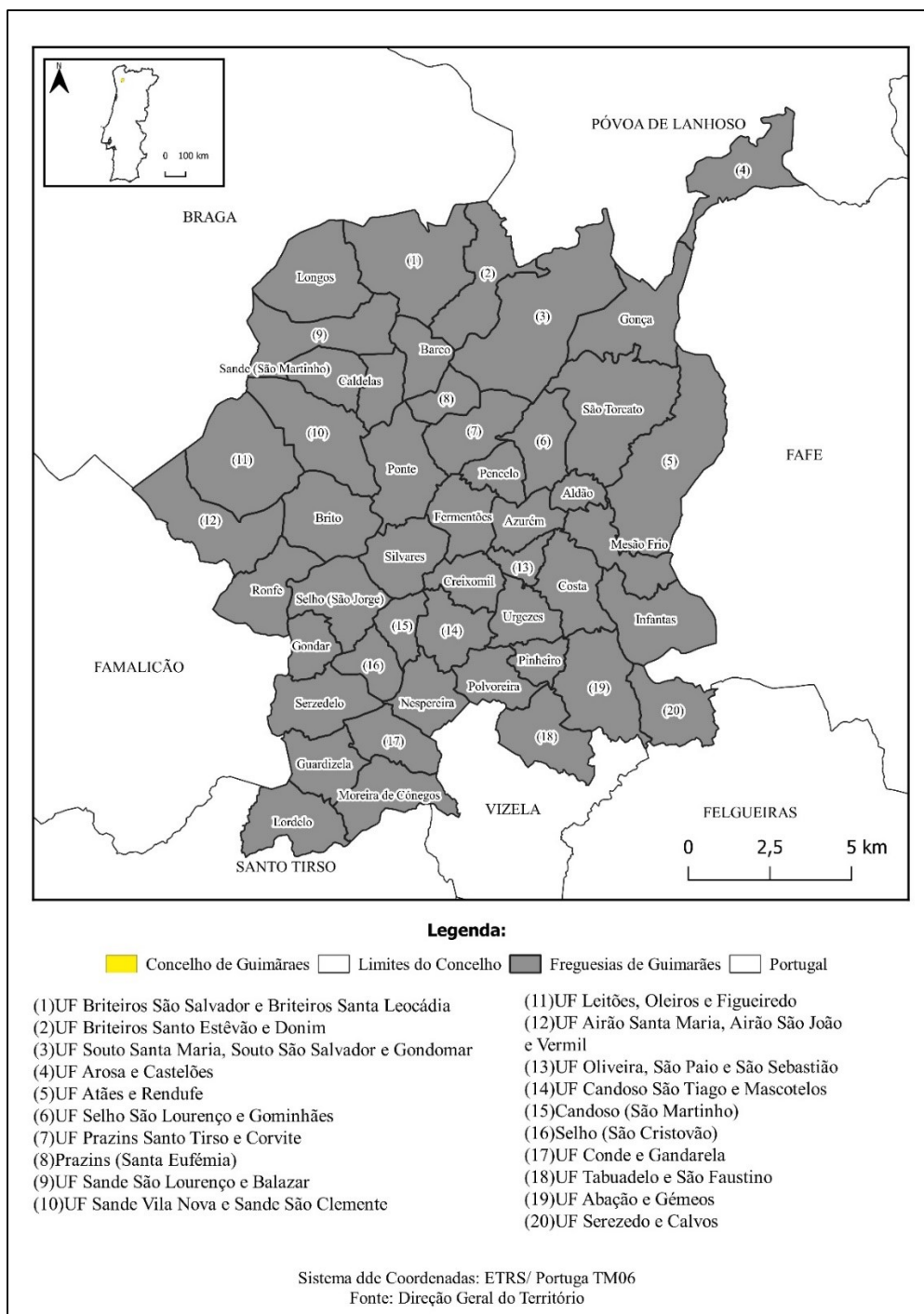


Figura 5 - Enquadramento das freguesias do concelho de Guimarães.

Fonte: Direção Geral do Território, 2019.

A Montanha da Penha localiza-se na região sudeste de Guimarães, e compreende parte das seguintes freguesias: Costa e Pinheiro, Abação e Gémeos, Mesão Frio, Urgezes, Serezedo e Calvos e Infantas, pertencentes ao concelho de Guimarães, e Cepães e Fareja, pertencentes ao concelho de Fafe (Figura 6).

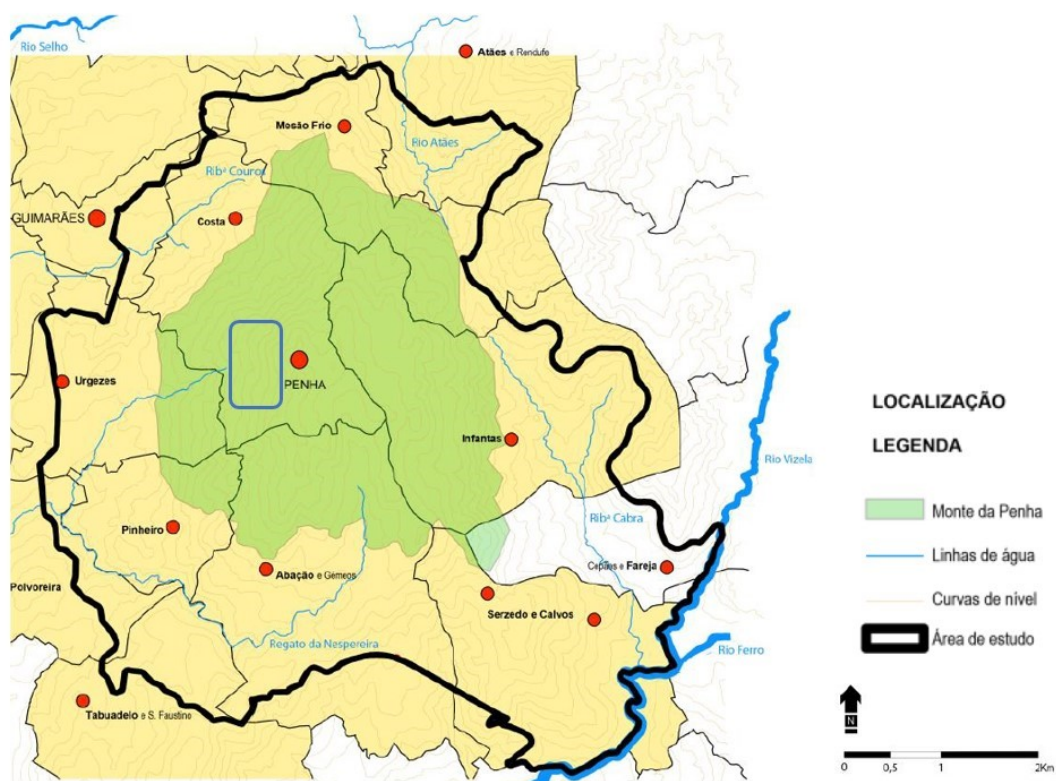


Figura 6 - Enquadramento da Montanha da Penha nos concelhos de Guimarães e de Fafe (adaptado de Fernandes, 2014), estando a área onde se localizam as minas de água subterrânea da Montanha da Penha demarcadas pelo retângulo a azul.

A Montanha da Penha está limitada a noroeste pelos montes de Outeiro e Penedice, Santa Marta e Sameiro, a norte pelo monte de Santa Marinha e a sudeste pela Senhora do Monte (Pinto, 2011). Esta montanha atinge uma altitude máxima de 613 metros, sendo o topo uma coroa planáltica orientada no sentido Norte-Sul, com 1,5 km de comprimento e 300 m de largura. Cerca de 23,5 % da área da Montanha da Penha está localizada entre 450 e 500 metros de altitude, 0,37 % está a uma cota inferior a 200 metros e apenas 0,1 %, a uma cota acima de 600 metros de altitude (Carvalho, 2014). A Figura 7 apresenta o aspeto aéreo da área de estudo enquanto a Figura 8 mostra um penedo fendido bem visível próximo do santuário.



Figura 7 - Vista aérea da Montanha da Penha (Fonte: <https://www.penhaguimaraes.com/pt/completo/11>).



Figura 8 - Penedo fendido junto ao Santuário, um dos vários blocos graníticos que se pode encontrar na Montanha da Penha.

3.3. Geologia e Geomorfologia

A Montanha da Penha localiza-se na unidade morfoestrutural ou zona geotectónica definida na Península Ibérica (Lotze, 1945; Farias *et al.*, 1987) – a Zona da Galiza Trás-os-Montes (ZGTM) do Maciço Ibérico (Ribeiro *et al.*, 2007; Dias & Ribeiro, 2013), do Domínio Xistoso (Parautóctone), a qual ocupa a parte ocidental e central da Península Ibérica (Figura 9).

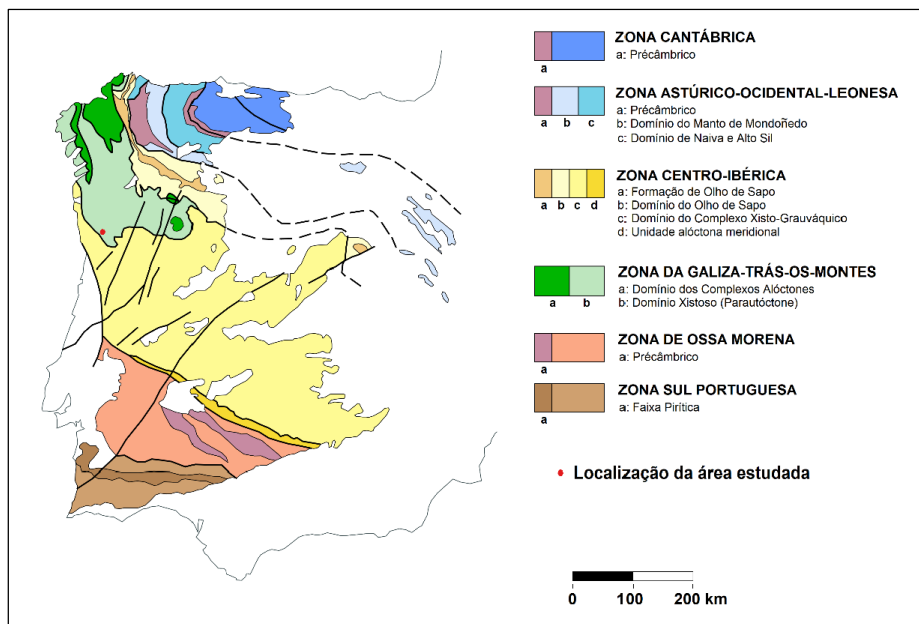


Figura 9 - Unidades morfoestruturais da Península Ibérica e zonas definidas no Maciço Ibérico (Pérez-Estaún *et al.*, 2004). A região de Guimarães está marcada a vermelho.

Uma das características mais marcantes da ZGTM e da Zona Centro Ibérica (ZCI) é a presença de rochas granitóides, as quais estão relacionadas predominantemente com o magmatismo Varisco, com diferentes idades de implantação, e classificadas como ante-, sin-, tardi- e pós-D3 (Ferreira *et al.*, 1987).

Pela observação da carta geológica de Guimarães (Figura 10) é notório que o Concelho de Guimarães apresenta uma grande diversidade de granitóides de idade Varisca, dominando os granitóides biotíticos. As rochas encaixantes são metassedimentos de idade Silúrica, incluindo a unidade autóctone dos “Grauvaques de Sobrado” e a unidade alóctone conhecida por “Unidade de Vila Nune” da Zona Galiza Trás-os-Montes, e ainda metassedimentos recristalizados (S). As rochas plutónicas, no seu conjunto, cobrem cerca de 90 % da área abrangida pela folha 9-B de Guimarães (Oliveira, 2017).

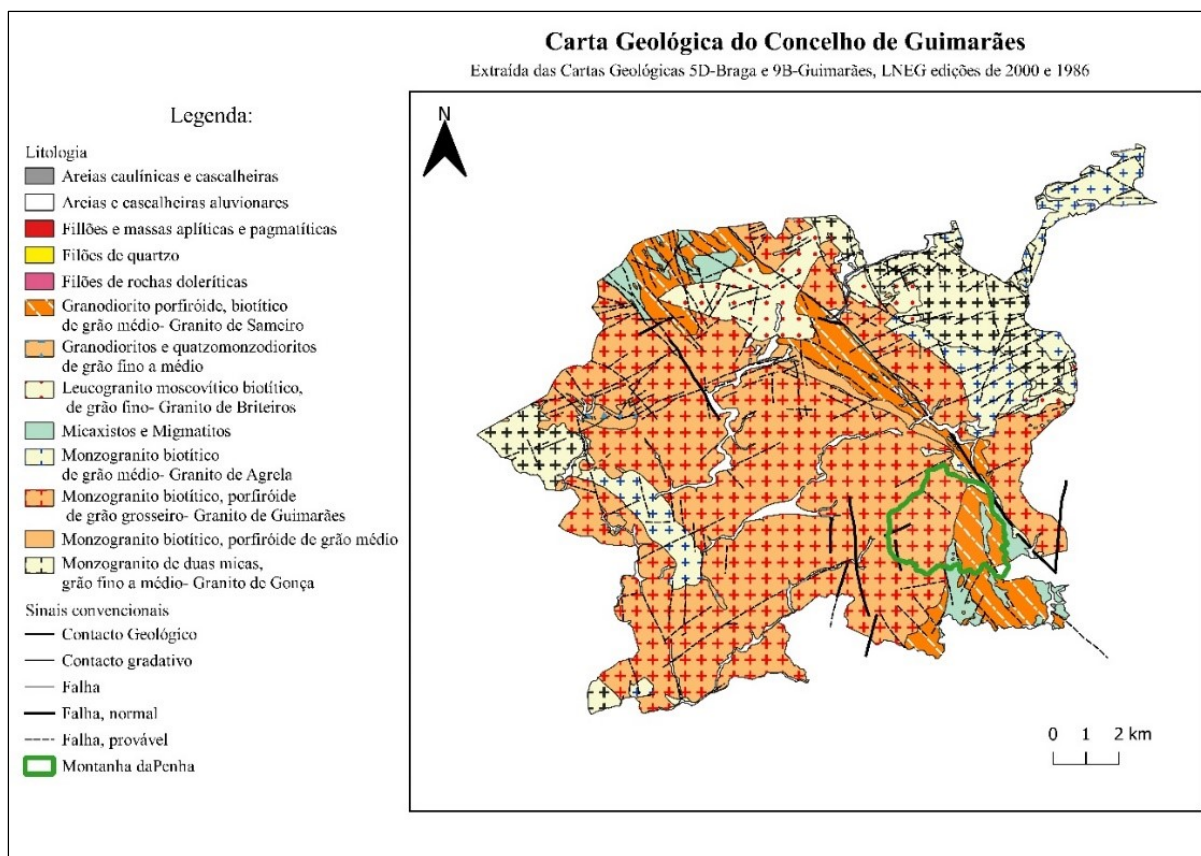


Figura 10 – Esboço da carta geológica do concelho de Guimarães. Adaptada das cartas geológicas 5D (Braga) e 9B (Guimarães) na escala 1:50000, produzidas pelo LNEG (2000 e 1986).

A geologia da Montanha da Penha é dominada por um substrato granítico que tem vindo a sofrer evolução geomorfológica ao longo da história da região. O relevo granítico é evidenciado pela presença de cabeços cobertos por grandes blocos arredondados que se empilham e distribuem de forma caótica e desordenada. O Granito de Guimarães representa a litologia de base, e que faz parte de um dos principais mantos graníticos Variscos do Norte de Portugal (Fernandes *et al.*, 2019). Este granito corresponde a um monzogranito biotítico, porfiróide, de grão grosseiro (Pinto, 2011).

O Granito de Guimarães insere-se no grupo dos granitóides biotíticos tardi-F3, com uma idade de instalação situada no intervalo 306-311 Ma (Dias *et al.*, 1998). Trata-se de uma fácies granítica muito idêntica à dos granitos que ocorrem em área limitrofes: Granito de Celeirós, na região de Braga, Granito de Vieira do Minho e Granito de Celorico de Basto (Dias *et al.*, 2010).

Macroscopicamente, o Granito de Guimarães apresenta como mineral principal, o feldspato potássico, com cristais bem desenvolvidos (Figura 11 e 12). O feldspato potássico tem uma ampla faixa de expressão, podendo atingir os 50 % da totalidade dos minerais constituintes da rocha (Andrade *et al.*, 1985). Através da análise microscópica, este granito apresenta uma reduzida deformação, em que a extinção ondulante do quartzo é inexistente ou mínima. A biotite é a mica mais visível, na qual é possível

observar o intenso pleocroísmo, variando de tons castanho-avermelhados a castanhos-claros. É muito rica em inclusões de apatite, zircão, monazite e minerais opacos. Deteta-se a presença de alanite, embora raramente, assim como de turmalina (Pinto, 2011).



Figura 11 – Megacristais de feldspato potássico observáveis no granito de Guimarães.



Figura 12 – Granito de Guimarães, no qual se observam alguns enclaves máficos (manchas a preto) conjuntamente com biotite.

Na área, o Granito de Guimarães contacta com outras litologias mais antigas, nomeadamente o Granito de Felgueiras e xistos e metassedimentos de idade Silúrica (Figura 13). O Granito de Felgueiras é

considerado um granodiorito dado que apresenta uma elevada percentagem de plagioclase cálcica (Fernandes *et al.*, 2019).

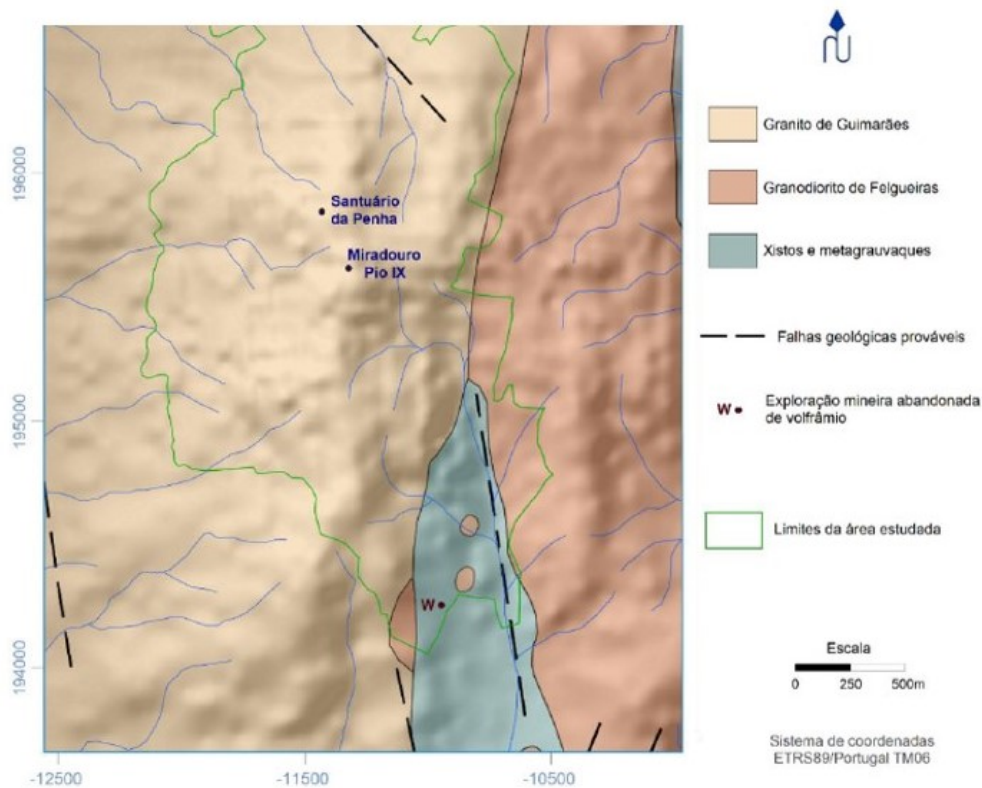


Figura 13 - Geologia da área envolvente da Montanha da Penha (adaptado de Fernandes *et al.*, 2019).

As principais estruturas geológicas (falhas) que ocorrem na região em estudo, observadas através das Figuras 10 e 13, apresentam uma orientação preferencial NNW-SSE.

A geomorfologia da Montanha da Penha está fortemente assinalada pela ocorrência dos maciços rochosos de natureza granítica (Figura 14). Neste contexto, destaca-se o plutão granítico de Guimarães, no qual se insere o maciço central da Penha. Este maciço (zona de cume) e as suas vertentes envolventes revelam dois níveis de evolução geomorfológica:

- 1 - Cume rochoso (maciço central);
- 2 - Encostas laterais com afloramentos rochosos descontínuos.

Neste segundo nível, evidencia-se um maior grau de evolução geomorfológica pois, para além da menor densidade de afloramentos rochosos, os blocos graníticos tendem a ser mais arredondados, os níveis de saibro (granito alterado) estão mais visíveis e as secções de solo são mais espessas (Fernandes *et al.*, 2019).



Figura 14 – Geoforma visível na Montanha da penha- aglomerado de blocos graníticos arredondados observados no miradouro do Pio IX.

A Montanha da Penha apresenta vários elementos geomorfológicos, os quais constituem um património geológico a preservar, como será apresentado no capítulo 4.

3.4. Hidrografia e Hidrogeologia

O concelho de Guimarães integra-se, na sua totalidade, na sub-bacia hidrográfica do rio Ave, a qual se localiza na região noroeste de Portugal e insere-se na Região Hidrográfica do Cávado, Ave e Leça (Plano de Gestão de Região Hidrográfica, 2016). Possui uma área total de aproximadamente 1391 km², sendo limitada a Norte pela bacia hidrográfica do rio Cávado, e a este, pela bacia hidrográfica do rio Leça e do rio Douro (Figura 15).

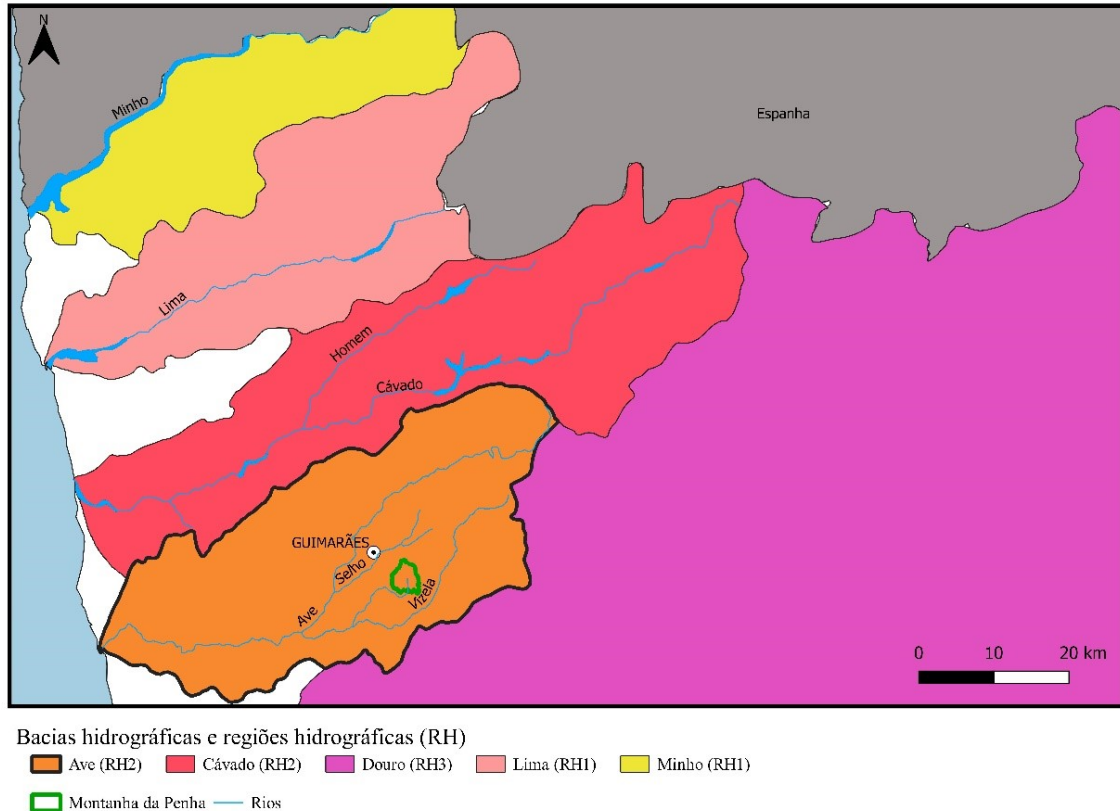


Figura 15 – Distribuição das bacias hidrográficas e regiões hidrográficas na área de estudo (Adaptado de Atlas do Ambiente, 2003).

O rio Ave é o principal curso de água desta bacia hidrográfica. Nasce na Serra da Cabreira, concelho de Vieira do Minho, a uma altitude de cerca de 1260 metros, e desagua no Oceano Atlântico, a sul no concelho de Vila do Conde (Figura 16) (Plano de Gestão de Região Hidrográfica, 2016). Esta bacia hidrográfica abrange 19 municípios - Barcelos, Braga, Cabeceiras de Basto, Celorico de Basto, Fafe, Felgueiras, Guimarães, Lousada, Maia, Montalegre, Paços de Ferreira, Póvoa de Lanhoso, Póvoa de Varzim, Santo Tirso, Trofa, Vieira do Minho, Vila do Conde, Vila Nova de Famalicão e Vizela (Câmara Municipal de Guimarães, 2015; Figura 16).

Em Guimarães, o rio Ave tem uma extensão de cerca de 31 km (um terço do total da sua extensão) e constitui a fonte principal de captação de água potável para abastecimento da população (13 hm³/ano) (Câmara Municipal de Guimarães, 2015). O rio Ave percorre 14 Freguesias/Uniões de Freguesia (UF) do concelho de Guimarães: Serzedelo, Gondar, Ronfe, Selho (São Jorge), Silvares, Brito, Ponte, UF de Sande Vila Nova e Sande São Clemente, Caldelas, Barco, Prazins (Santa Eufémia), UF de Souto Santa Maria, Souto São Salvador e Gondomar, UF de Briteiros Santo Estevão e Donim e UF de Arosa e Castelões (Censos, 2011).

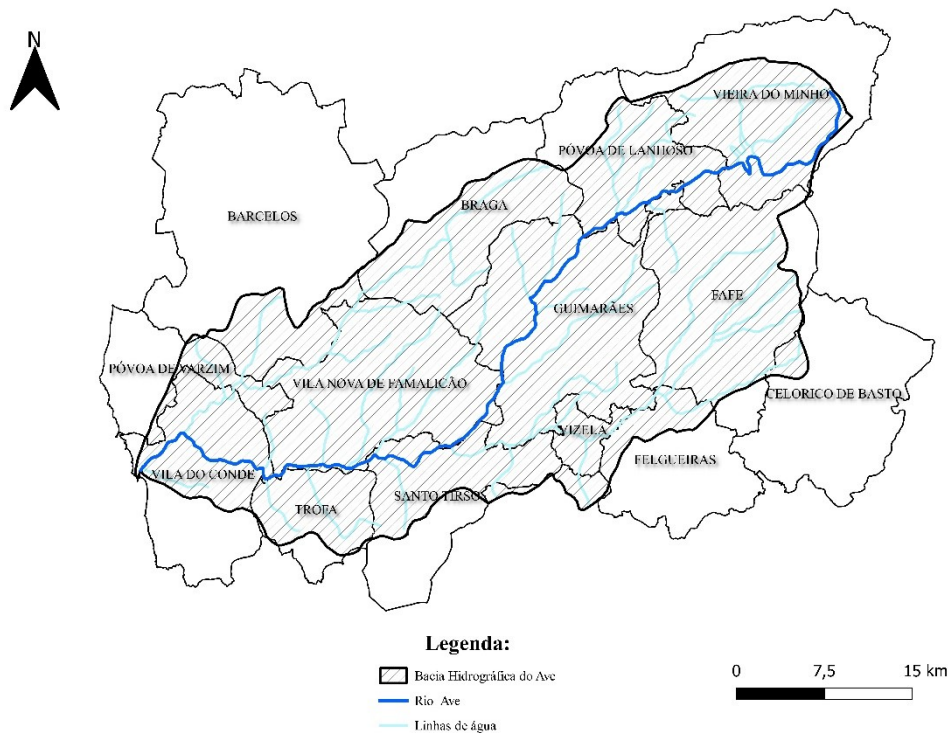


Figura 16 - Concelhos abrangidos pela bacia hidrográfica do rio Ave (às riscas) (adaptado de Atlas do Ambiente, 2003).

Na implementação da Diretiva Quadro da Água, o rio Ave foi classificado como “*rio do Norte de média-grande dimensão*”, com uma área de drenagem superior a 100 km², expressando o clima típico do norte do país, com uma precipitação média anual elevada (precipitação média: 1190,25 ± 347,30 mm/ano) e uma temperatura média anual relativamente baixa (temperatura média: 12,62 ± 1,23 °C) (INAG, 2008). Este rio insere-se numa zona siliciosa, maioritariamente constituída por xisto e granito, apresentando a água uma reduzida mineralização (INAG, 2008).

Com exceção dos setores mais próximos das nascentes, os cursos de água nesta bacia hidrográfica geralmente apresentam graves perturbações, tanto ao nível físico-químico, como biológico, resultando em degradação da cortina ripária, alteração do canal e má qualidade da água, o que, por vezes, tem reflexos nítidos nas comunidades aquáticas. O interesse biológico e a diversidade do estuário do rio Ave foram reduzidos a um pequeno terreno comum de cerca de 3 hectares, onde subsistem apenas algumas espécies de plantas ruderais e muitas outras características de regiões pantanosas, com densidades faunísticas baixas (Plano de Gestão de Região Hidrográfica, 2016).

A posição topográfica mais elevada da Montanha da Penha confere-lhe a presença de uma rede hidrográfica complexa e radial, que conduz a várias linhas de água temporárias e permanentes. Na sua maioria, as linhas de água com nascente na Montanha da Penha constituem afluentes das sub-bacias

hidrográficas do rio Selho, localizado a noroeste, e do rio Vizela, a sul, sendo ambos os rios afluentes do rio Ave (Figura 17) (Fernandes *et al.*, 2019).

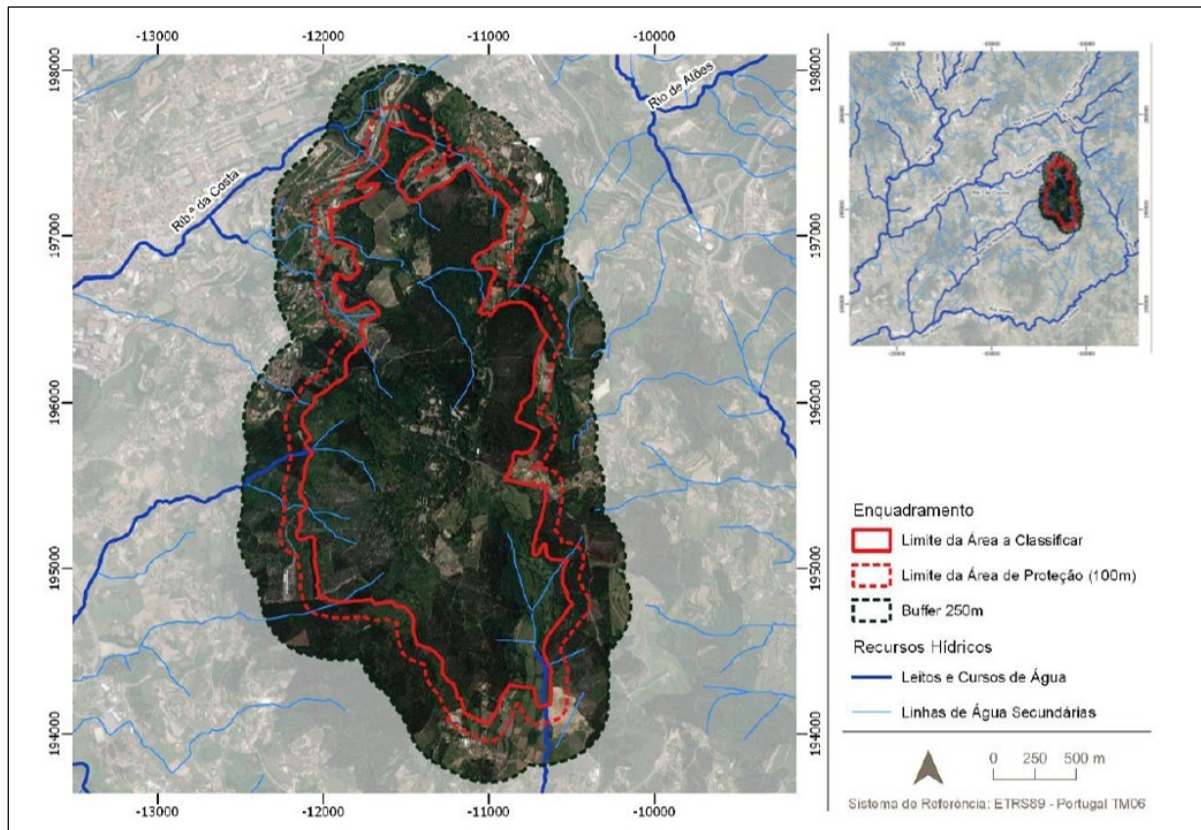


Figura 17 - Rede hídrica da Montanha da Penha (adaptado de Fernandes *et al.*, 2019).

O funcionamento dos sistemas hidrogeológicos é influenciado por vários fatores, como o clima, as características da zona não saturada e as propriedades hidrodinâmicas e geoquímicas das formações geológicas onde circula a água subterrânea. A infiltração e recarga do aquífero são significativamente influenciadas pelas características do solo, particularmente pela porosidade e permeabilidade (Hudak, 2001). Ou seja, verifica-se que as propriedades das formações geológicas condicionam, em grande medida, os processos hidrogeológicos, sobretudo a infiltração e a recarga dos sistemas aquíferos, o tipo de circulação – através de meio poroso ou fraturado – e a interação química água-rocha.

Portugal possui uma variedade de sistemas hidrogeológicos, podendo ser porosos, fissurados e/ou cársicos, que influenciam o armazenamento e transmissão do fluxo da água subterrânea. Portugal Continental está dividido em quatro grandes unidades hidrogeológicas: Maciço Antigo, Orla Ocidental, Orla Meridional e Bacia do Tejo-Sado (INAG, 1997; Figura 18).

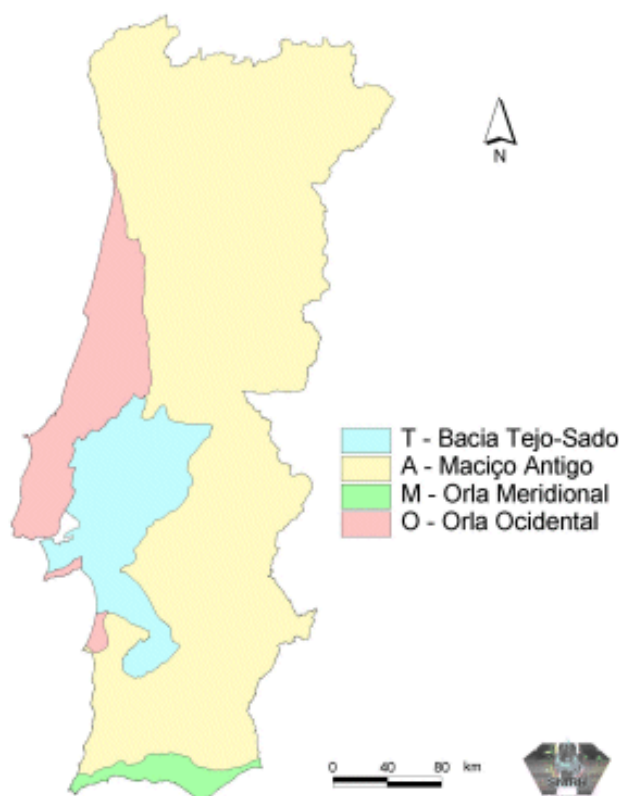


Figura 18 - Unidades hidrogeológicas de Portugal Continental (Almeida et al.,2000).

A área em estudo encontra-se no domínio hidrogeológico do Maciço Antigo ou Ibérico de Portugal (Figura 18). Nesta zona predominam rochas ígneas e metamórficas, com um domínio dos sistemas aquíferos fissurados. A Montanha da Penha é constituída essencialmente por rochas graníticas. Estes tipos de rochas são muito pouco permeáveis, tendo uma capacidade limitada para a formação de reservatórios de água subterrânea (Custodio & Llamas, 1983). Durante muito tempo estas rochas foram consideradas impermeáveis em profundidade. No entanto, a existência de fraturação neste substrato levou a que as suas potencialidades hidrogeológicas fossem consideradas elevadas. A fraturação que as rochas apresentam origina a porosidade, também designada como porosidade de fratura, a qual permite, quando as fraturas estão abertas e interligadas entre si, a circulação e armazenamento de água e a consequente formação de aquíferos (Pereira, 1999).

A capacidade de armazenamento e transmissão do fluxo de água subterrânea deste tipo de rochas é significativamente impactada pelos processos de alteração (meteorização). Quando expostas a agentes atmosféricos, as rochas sofrem uma variedade de processos físicos (agentes climáticos e vegetais, desintegração mecânica) e químicos (reações de hidrólise, dissolução, oxidação, entre outros) que podem alterar os minerais que constituem a rocha (Custodio & Llamas, 1983).

A ação dos processos referidos anteriormente pode levar à formação de uma camada superior de alteração e/ou à modificação das características das descontinuidades existentes. No último caso, a meteorização química de feldspatos, piroxenas e anfíbulas contribuem para o aumento da porosidade e, por vezes, também da permeabilidade (Custodio & Llamas, 1983), quando provocam o alargamento do espaço entre as descontinuidades (Pereira, 1999). No entanto, a precipitação de minerais argilosos nas fraturas pode conduzir à diminuição da porosidade (Custodio & Llamas, 1983). O perfil vertical característico destes meios, é usualmente constituído por uma camada superficial de alteração, a qual se segue, em profundidade, rocha mais ou menos fraturada e pouco alterada até chegar à rocha sã sem fraturas (Pereira, 1999).

Além destes fatores geológicos, existem outros, que controlam a presença e o comportamento das águas subterrâneas, como a topografia (geomorfologia). A topografia relaciona-se com o relevo, consoante o declive mais ou menos acentuado, podendo favorecer, ou não, a formação de camadas de alteração. A escorrência superficial será maior ou menor, consoante a acentuação do relevo, refletindo-se na percentagem de infiltração eficaz (Fernandes, 1992).

3.5. Clima

O clima determina os processos de meteorização do solo e subsolo. Através da insolação, da precipitação de gelo e do vento como elementos dominantes, constitui o principal elemento no processo de desenvolvimento do solo e do subsolo. A precipitação e a temperatura assumem extrema importância ao nível da infiltração da água subterrânea: a precipitação influencia essencialmente a quantidade de água disponível, enquanto a temperatura intervém principalmente nos processos de evaporação da água precipitada (Neves *et al.*, 2007).

Atualmente, o Planeta Terra atravessa uma fase de alteração climática. Esta define-se como mudanças no estado do clima da Terra ao longo de décadas ou séculos; refere-se, também, a alterações nas atividades naturais e antropogénicas no balanço energético mundial (Arneth *et al.*, 2019). Exemplos de tais mudanças incluem: subida do nível do mar, derretimento das camadas de gelo e calotes polares, destruição da camada de ozono (O₃), mudanças nos padrões de precipitação e temperatura do ar (Field e Barros, 2014).

O Quinto Relatório de Avaliação do IPCC¹ indicou que as alterações climáticas podem afetar a recarga da água subterrânea de várias maneiras, podendo variar entre aumentar e diminuir a sua quantidade. Mudanças nos padrões de chuva, eventos de seca e a frequência que estes eventos acontecem são as

¹ IPCC - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change)

principais características do impacto das alterações climáticas. Além disso, o aumento da temperatura leva ao aumento da evaporação, levando a menor reabastecimento de água subterrânea. Também, o aumento da evaporação foi sincronizado com atividades antropogénicas (como bombeamento de água), o que pode ter impacto na quantidade e qualidade das águas subterrâneas (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, 2014).

Cunha *et al.* (2006), refere que haverá um declínio na disponibilidade hídrica anual devido ao aumento da temperatura, uma vez que ocorrerá uma diminuição dos níveis de precipitação e a taxa de evapotranspiração potencial irá aumentar. Assim, haverá uma diminuição perceptível no caudal dos cursos de água superficiais, mas os sistemas hídricos subterrâneos serão os mais afetados pelas mudanças climáticas, com uma diminuição acentuada nas taxas de recarga (Caria, 2012).

Deste modo, neste subcapítulo será descrita a variação do clima ao longo do período em que este estudo decorreu e como este fator ambiental poderá influenciar o comportamento do sistema hídrico. Inicialmente descreve-se o clima característico do município de Guimarães, passando seguidamente para a caracterização da área em estudo, recorrendo aos dados climatológicos da estação meteorológica da Penha (Anexo 1), localizada nas seguintes coordenadas geográficas: +41° 25' 45", -8° 16' 6".

O concelho de Guimarães, situado na região noroeste de Portugal Continental, caracteriza-se por apresentar um clima com afinidades mediterrânicas, mas com forte influência atlântica, resultando num clima de temperaturas amenas, com baixas amplitudes térmicas e forte pluviosidade média (Bento Gonçalves *et al.*, 2014). Devido à passagem frequente de superfícies frontais e ao impacto das montanhas adjacentes à costa, a pluviosidade é elevada, com totais anuais superiores a 1500 mm (Neves *et al.*, 2007).

Durante o período em que decorreu este estudo, a temperatura média na Montanha da Penha foi de 12,1°C. O mês de novembro de 2021 registou a temperatura mais baixa, 9,7°C, enquanto o mês de maio de 2022 registou a temperatura mais elevada, de 16,85 °C (Figura 19).

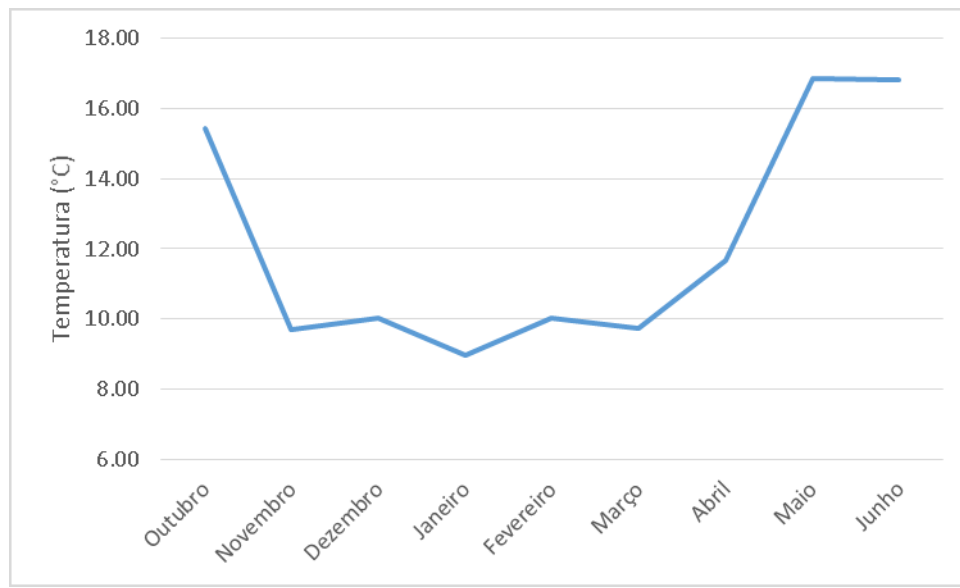


Figura 19 - Valores mensais médios da temperatura na Montanha da Penha entre outubro de 2021 e junho de 2022.

O relevo, sob a presença de montanhas com elevadas altitudes, e a proximidade ao litoral (30 km em linha reta), entre outros fatores, determinam as altas temperaturas no verão e temperaturas relativamente baixas no inverno. Além disso, sabe-se que em áreas montanhosas (como a Montanha da Penha) ocorre um arrefecimento que se traduz num gradiente de $1^{\circ}\text{C}/182\text{ m}$, que é provocado pela expansão do ar devido à diminuição da pressão atmosférica em altitude (Ferreira *et al.*, 2018).

A precipitação é a principal fonte de recarga natural da água subterrânea, a qual é controlada por vários fatores físicos e climáticos, tais como a geologia local, tipo de solo, declive, vegetação, cobertura do solo e evapotranspiração (Carrera-Hernández *et al.*, 2012; Kubicz *et al.*, 2019).

A área em estudo caracteriza-se por apresenta níveis de precipitação muito baixos, os quais são bastante atípicos nesta região. A partir da Figura 20 é possível observar que os meses de outubro de 2021, dezembro de 2021 e março de 2022 foram os que se registaram maior precipitação, ou seja, a partir destes dados pode verificar-se que a estação chuvosa é constituída pelo período entre outubro de 2021 e abril de 2022, havendo alguns meses em que a precipitação registada foi muito baixa, como é o caso de novembro de 2021, janeiro e fevereiro de 2022. Já o mês de maio 2022 foi o mês em que se assinalou menor precipitação, constituindo, os meses de maio e junho de 2022, a estação seca.

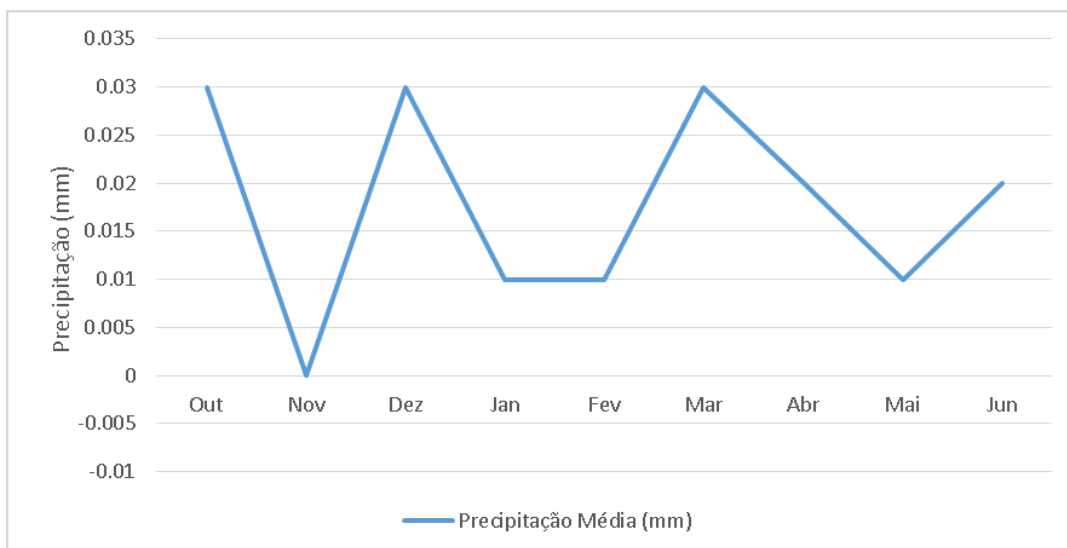


Figura 20 - Valores mensais médios da precipitação na Montanha da Penha entre outubro de 2021 e junho de 2022.

Como referido anteriormente, constata-se que o período em que decorreram os trabalhos de campo foi bastante atípico, dado que a precipitação observada foi muito baixa e irregular, para uma área que se caracteriza por apresentar níveis de pluviosidade elevados. Deste modo, são apresentados, de modo comparativo, os dados que caracterizam, a nível da precipitação, no período entre 1986 e 2016 a cidade de Guimarães.

Na Figura 21 está representada a distribuição da precipitação mensal ao longo do ano, no período entre 1986 e 2016, assim como o valor máximo de precipitação diário registado. Os meses de setembro (128,2 mm) e outubro (130,0 mm) registaram as maiores precipitações máximas diárias, em termos de chuvas severas, no entanto, as precipitações máximas são superiores a 100 mm, no período entre setembro e janeiro.

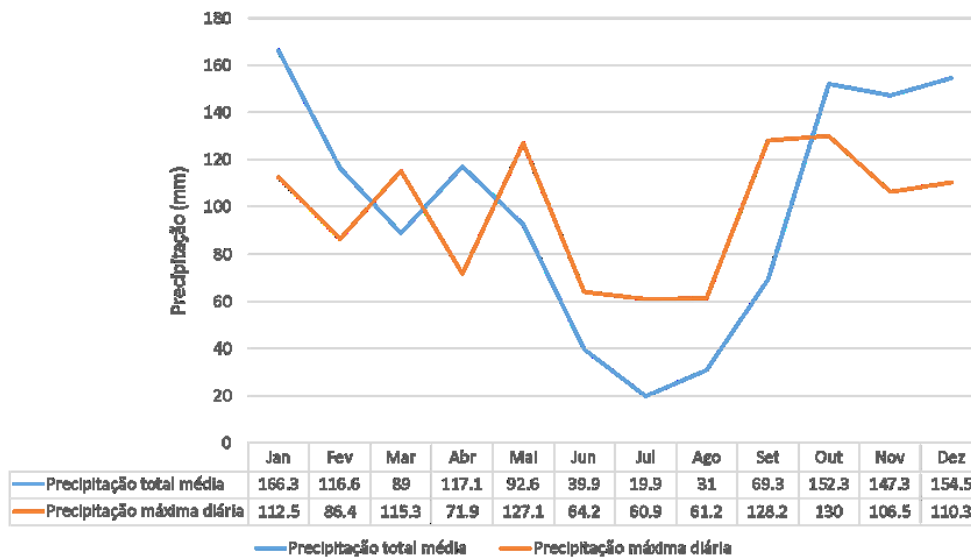


Figura 21 - Valores mensais médios de precipitação no concelho de Guimarães entre os anos 1980 - 2016.

Fonte: <http://snirh.apambiente.pt>.

Em Portugal, a humidade mostra a influência do oceano Atlântico (Brás, 2020). A área de estudo desenvolve-se numa zona montanhosa e apresenta uma humidade relativa do ar constante ao longo do período em estudo (Figura 22). A humidade relativa do ar é também um contributo importante para a recarga dos sistemas hídricos, fenómeno que pode ser designado como “chuva oculta” (Calado, 2001).

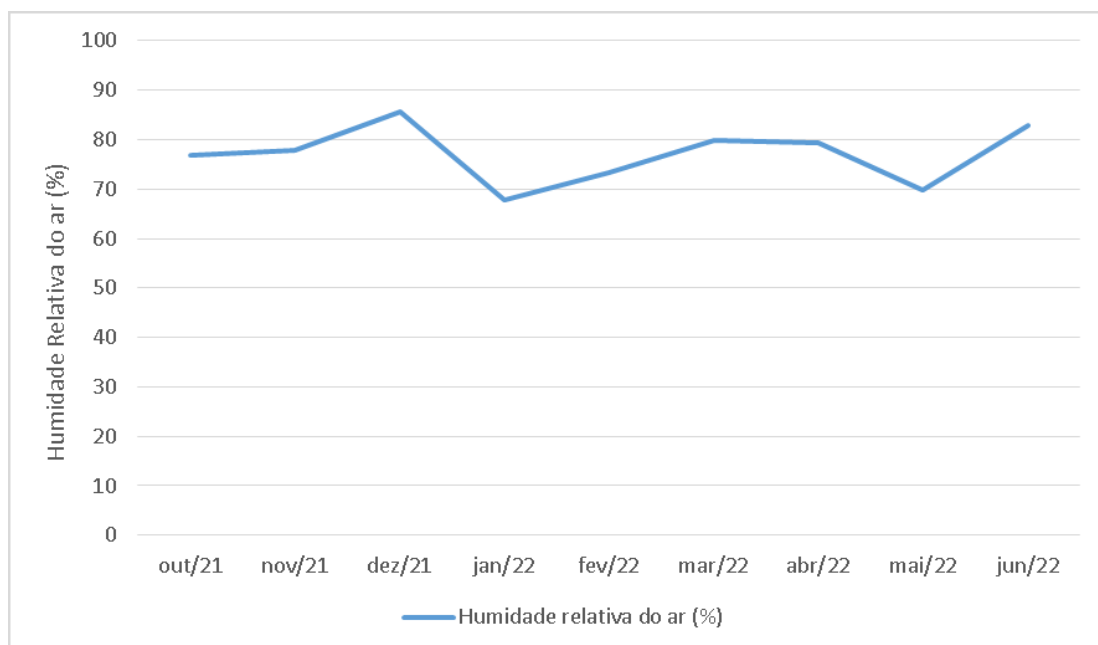


Figura 22 - Valores mensais médios da humidade relativa do ar na Montanha da Penha, entre outubro de 2021 e junho de 2022.

3.6. Uso e ocupação do solo

Segundo o Plano Diretor Municipal de Guimarães (Plano Diretor Municipal, 2015), a ocupação do solo no concelho de Guimarães está dividida nas seguintes categorias (Figura 23):

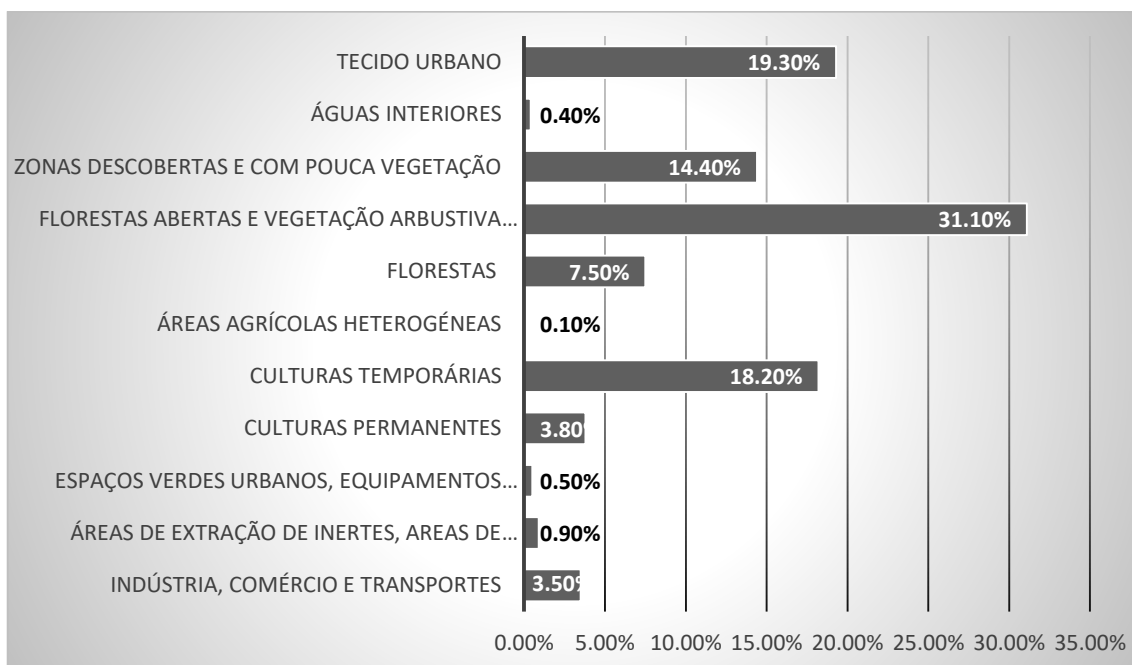


Figura 23 - Ocupação do Solo no concelho de Guimarães (Plano Diretor Municipal, 2015).

Assim, os solos agrícolas (Culturas permanentes - 3.80 %, culturas temporárias – 18.20 %, áreas agrícolas heterogêneas – 0.10 %; Figura 23) e florestais (florestas – 7.50 %, Florestas abertas e vegetação herbácea – 31.10 %; Figura 23) predominam neste município (aproximadamente 60,7 %). No entanto, o crescimento das áreas residenciais resultou na redução das regiões florestais e agrícolas, que ainda assim são os setores com ocupação mais estável (Plano Diretor Municipal, 2015).

A ação transformadora do Homem sobre a paisagem, tem levado a grandes alterações na área da Montanha da Penha, no que respeita à paisagem agrícola e urbana, bem como, à dimensão e composição das áreas de floresta (Figura 24).

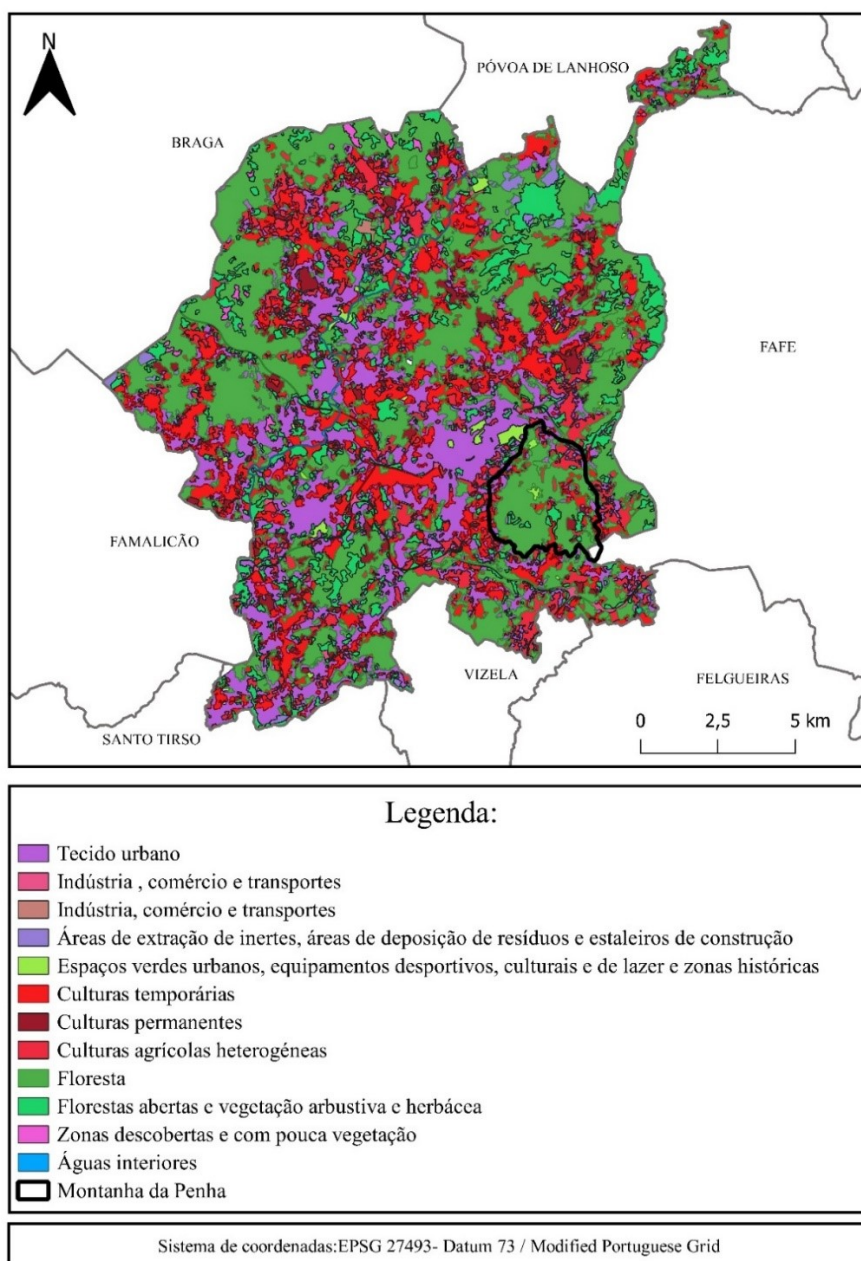


Figura 24 - Uso e ocupação de solo no concelho de Guimarães (Fonte: Câmara Municipal de Guimarães, 2015).

De acordo com Oliveira (2011), desde a década de 60, a área florestal e agrícola tem vindo a diminuir e a área social (habitações, equipamentos, entre outras) a expandir-se ao longo das vertentes da Montanha da Penha. Relativamente à ocupação da Montanha da Penha, a área florestal domina claramente a paisagem (48,3 % da área total), apesar da expansão urbana (agora com uma incidência de 11,1 %) já ter atingido proporções descaracterizadoras da paisagem. Entre os anos de 1960/68 e 1999, verificou-se uma diminuição da área de uso florestal, na ordem dos 3 %, e na ordem dos 13 % da área agrícola. Estas áreas terão sido ocupadas por áreas sociais, uma vez que estas mostraram um aumento na ordem dos 10,5 %.

Esta situação traduziu-se na degradação dos recursos naturais em grande escala e, resultando na descaracterização do ambiente florestal da Montanha da Penha, muito característico desta região no passado.

Para concluir este capítulo seguir-se-á o subcapítulo *Enquadramento ambiental e sustentável*, no qual serão descritas as várias fases pelas quais o município de Guimarães tem atravessado com o objetivo de contribuir para a construção de um território mais sustentável e ambientalmente saudável.

3.7. Enquadramento ambiental e sustentável

O município de Guimarães, tanto no passado como no presente, tem sido frequentemente premiado pelas políticas que defende e que coloca em prática, em prol de um maior e melhor desenvolvimento sustentável da região. Em 2001, Guimarães viu o seu Centro Histórico classificado, pela UNESCO, como Património Mundial da Humanidade. Mais tarde, em 2012, Guimarães foi elevada a *Capital Europeia da Cultura*, num momento que demonstrou a capacidade da cidade na organização de grandes eventos e na promoção do envolvimento da população. Pese embora, a temática do Desenvolvimento Sustentável tenha sido introduzida na agenda política, de forma mais concreta, dois anos mais tarde, a verdade é que este evento, pelo envolvimento dos cidadãos, e pelo conjunto de reabilitações de edificado que permitiu, foi já um exemplo desse desígnio. Um ano volvido, Guimarães voltaria a ser distinguida, desta feita como *Cidade Europeia do Desporto*, recebendo e realizando várias atividades desportivas, não apenas de âmbito competitivo, mas também recreativo, nas quais a população vimaranense esteve envolvida e bastante participativa. Esta iniciativa veio comprovar que Guimarães é considerada como uma “*cidade inclusiva*”, capaz de mobilizar recursos e de apoiar as aspirações de pessoas e organizações na construção de um território cada vez mais sustentável.

Os anos seguintes marcaram várias transformações no setor ambiental e sustentável para o futuro de Guimarães. Em 2013, com a inclusão do Desenvolvimento Sustentável na agenda política, definiu-se a visão de *Guimarães Mais Verde*. Esta iniciativa determinou uma nova forma de Governança para o concelho, tendo como pilares fundamentais: a Liderança, a (re) Educação, a Partilha, o Envolvimento e a Cooperação (Loureiro *et al.*, 2019).

Para a implementação deste modelo de governança, o município de Guimarães criou uma Estrutura de Missão, sediada no Laboratório da Paisagem, que integra diferentes estabelecimentos de ensino superior, como a Universidade do Minho (UM), Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro (UTAD), Universidade das Nações Unidas-Unidade Operacional em Governança Eletrónica (UNU-EGOV) e Instituto Politécnico do Cávado e Ave (IPCA). Muitos intervenientes consideram uma missão de “*cooperação inédita*”, a nível

nacional, e uma “*referência internacional*” (Laboratório da Paisagem, 2018). Esta Estrutura de Missão contempla ainda um comité técnico-científico constituído por técnicos do Município de Guimarães e especialistas e investigadores dos diferentes indicadores de sustentabilidade. Destaque-se, ainda, a existência de um Comité de Acompanhamento Externo, liderado pelo emérito professor Mohan Munasinghe e um Conselho Consultivo, constituído por mais de 400 instituições do concelho (Silva *et al.*, 2020).

O ano de 2014 foi considerado como um “*ano-chave*” no processo de consciencialização política para a questão ambiental no concelho de Guimarães. A partir desse momento, começaram a surgir sinais visíveis de uma solução prática e mais direcionada para as questões ambientais, tendo sido criado o *Laboratório da Paisagem*, um centro de investigação e educação ambiental.

Um dos principais objetivos do *Laboratório da Paisagem* (LdP) consiste em proporcionar a existência de um local dedicado ao estudo e interpretação da paisagem da cidade, bem como, ao desenvolvimento de atividades e iniciativas que melhorem o planeamento urbano e a monitorização ambiental do território, nomeadamente do município onde está sediado. Desta forma, esta Instituição sediada em Guimarães, pretende combinar o conhecimento e as valências técnico-científicas de duas universidades portuguesas: a Universidade do Minho e a Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, com a experiência na gestão do território do Município de Guimarães (Silva *et al.*, 2020).

Atualmente, a atuação do LdP está assente em dois pilares fundamentais: a Educação e a Sensibilização Ambiental, com o objetivo de alterar hábitos e comportamentos dos cidadãos, como forma de contribuir para o desenvolvimento sustentável; e a Investigação, Desenvolvimento e Inovação (I&D+i), com aplicação no território, dirigida a quatro áreas do conhecimento: Natureza e Biodiversidade, Recursos hídricos, Paisagem e Território e Economia Circular (Laboratório da Paisagem, 2022).

A criação do LdP, também contribuiu, para a implementação de um Ecosistema de Governança agregador e multidisciplinar que o Município de Guimarães tem, atualmente, em vigor desde 2014. Um modelo que intenta o envolvimento dos setores público e privado, as associações, a Academia e os cidadãos, na elaboração e desenvolvimento de ações que contribuam para o desenvolvimento sustentável do território.

Em 2017, Guimarães foi distinguido como o Município mais sustentável de Portugal (Município EcoXXI), com a atribuição de um galardão que reconheceu as políticas adotadas, a gestão do território, o associativismo, a cooperação e a cidadania, a capacidade de mobilização, a aposta na educação, o investimento na investigação, a criatividade, a inovação e o empreendedorismo, o desenvolvimento económico, a promoção e preservação do Património Natural e a aposta no turismo mais sustentável

(Silva *et al.*, 2020). Este prémio voltou a ser atribuído posteriormente, nos anos de 2018 e 2019. Ainda em 2018, foi tornado público que a candidatura do município de Guimarães a Capital Verde Europeia 2020 obteve o 5º lugar na lista de 13 cidades avaliadas (Silva *et al.*, 2020), destacando-se o 2º lugar que conquistou nos indicadores Natureza e Biodiversidade, Governança, Alterações Climáticas – Adaptação e Energia.

Nos últimos anos, e compreendendo a importância de uma aposta continuada na transformação do cidadão, o município de Guimarães, através do Laboratório da Paisagem, reforçou o apoio para o desenvolvimento de projetos na área ambiental das Juntas de Freguesia, quer sob a forma de candidaturas a financiamentos externos, quer de ações de sensibilização. Assim, nos últimos anos, Guimarães viu ser-lhe reconhecido o epíteto de município com mais freguesias premiadas com o galardão Eco Freguesias XXI, que distingue o trajeto destas na área da sustentabilidade. Estas distinções, demonstram que Guimarães e os seus cidadãos apresentam uma consciencialização ambiental bem coordenada e com os melhores padrões de desempenho ambiental, a nível nacional (Silva *et al.*, 2020). Também em 2021, o Município voltou a ver o seu Modelo de Governança distinguido, através da atribuição do Prémio Nacional de Sustentabilidade.

Apesar do reconhecimento que tem sido alvo e do percurso de melhoria nos diversos indicadores de sustentabilidade, o município apresenta ainda vários desafios, nomeadamente aqueles em que apresenta necessidade de recuperar um passivo ambiental intimamente ligado ao crescimento das cidades.

O município de Guimarães é, reconhecidamente, um território que conheceu um crescimento amparado pela forte industrialização no pós-revolução industrial, estando inserido numa das sub-regiões mais industrializadas do país (Silva *et al.*, 2020). Esta industrialização, particularmente na indústria do couro e têxtil, levou à utilização intensiva dos recursos hídricos que contribuiu, ao longo dos anos, para a degradação da qualidade dos rios, sinalizando-se as descargas de efluentes industriais e domésticos como principais fatores para a degradação da qualidade da água dos rios, originando perdas de biodiversidade e perda de identidade entre os rios e os cidadãos².

Com o intuito de melhorar a ligação entre os rios e os cidadãos, assim como implementar e aprimorar práticas para uma melhor e eficiente gestão dos recursos hídricos, o município de Guimarães, através do Laboratório da Paisagem, lidera uma rede, juntamente com mais sete municípios portugueses, de Cidades Circulares na área temática do Ciclo Urbano da Água, com o projeto “Circularidade da água: Por Todos e Para Todos (CApt²)”. Este projeto tem como objetivo principal desenvolver um modelo de

² CApt2- Circularidade da Água: Por Todos e Para Todos: <https://cidadescirculares.dgterritorio.gov.pt/capt2> (Consultado em novembro de 2021)

governança local participativo que identifique, avalie e capitalize as melhores práticas, tecnologias e resultados obtidos em projetos bem-sucedidos no domínio da gestão dos recursos hídricos. Em Guimarães, este projeto tem o intuito de valorizar o Património Natural estabelecido na recuperação da ligação rio-cidadão através dos projetos com práticas de cidadania participativa como os projetos: “*Ave para todos*”, “*Selho para todos*”, que estão integrados no programa de Educação Ambiental municipal “*PEGADAS*”³. Assim, no âmbito da Rede CApt² procura-se fortalecer a integração das componentes a participativa e técnica, considerando que o cidadão deve ser parte integrante das várias etapas que compreendem o Ciclo Urbano da Água² (Figura 25).



Figura 25 – Processo participativo no Ciclo Urbano da Água (adaptado de WaCClim, <https://wacclim.org/about/>)

Fonte: Laboratório da Paisagem, Candidatura CAPT².

O Município de Guimarães iniciou intervenções no seu território em preparação da candidatura a *Capital Verde Europeia 2020* – que agora repetirá para o Ciclo de 2025, destacando-se o processo de

³ O Programa Programa Ecológico de Guimarães para a Aprendizagem do Desenvolvimento Ambiental Sustentável (PEGADAS) é um programa de educação ambiental coordenado e desenvolvido pelo Laboratório da Paisagem e pela Câmara Municipal de Guimarães. Este programa assenta na estratégia pensada para todo o concelho ao nível do desenvolvimento sustentável e na promoção de políticas ambientais, ecológicas e inclusivas.

Classificação da Montanha da Penha a **Paisagem Protegida de âmbito Local**. Estas áreas correspondem a locais de restrição de uso e ocupação do solo, com o objetivo de minimizar a deterioração ambiental e funcionar como territórios de gestão que promovam a proteção ambiental. Segundo Meireles *et al.* (2017), a Montanha da Penha possui uma área natural, com uma flora e fauna muito variada, miradouros e percursos pedestres. Assim, esta classificação deve ser encarada como uma importante medida de proteção e valorização, com o objetivo primordial de preservar a biodiversidade, os valores culturais, estéticos e paisagísticos, bem como, a presença harmoniosa do Homem e das suas atividades, do ponto de vista da gestão racional dos recursos naturais e da sua valorização.

A Montanha da Penha já integra a Estrutura Ecológica Municipal (EEM) nos níveis I e II. O nível I engloba componentes cuja preservação deve ser assegurada e que têm como função contribuir para a estabilidade física e sustentabilidade ecológica, e o nível II engloba componentes naturais e culturais únicas que constituem continuidades com os restantes sistemas, e que pelas suas características não obrigam à imposição de um regime não edificável (Fernandes *et al.*, 2019).

4. Classificação de âmbito local da Montanha da Penha a Paisagem Protegida

No contexto das estratégias ambientais que se têm vindo a desenvolver, a Câmara Municipal de Guimarães iniciou o processo de classificação da Montanha da Penha como Paisagem Protegida de Âmbito Local, proposta que deve ser entendida como uma medida de proteção e de valorização do local. Entre os valores naturais da Montanha da Penha, destacam-se os valores geomorfológicos e geológicos, definidos como geossítios no PDM (Plano Diretor Municipal, 2015). A Montanha da Penha apresenta um elevado valor e interesse geológico devido à sua natureza granítica, integrando também um conjunto diversificado de elementos geomorfológicos, com destaque para os grandes blocos dispersos nas vertentes (as penhas), um importante geopatrimónio a valorizar (Vieira *et al.*, 2019).

As áreas protegidas constituem uma importante ferramenta para uma proteção ambiental mais eficaz, preservando os locais de importância ecológica, económica, cultural, artística e científica. As paisagens naturais foram alteradas como resultado da degradação do ambiente natural causada pela conversão de inúmeras áreas para usos agrícolas e urbanos, diminuindo a qualidade e quantidade dos serviços ambientais prestados (Follmann *et al.*, 2020). A criação de áreas protegidas oferece uma oportunidade importante para reavaliar a necessidade de integração do Homem com o ambiente, acreditando que esta união é a forma mais eficaz de manter a estabilidade e resiliência do sistema (Follmann *et al.*, 2020). De acordo com o Decreto-Lei n.º 142/2008 de 24 de Julho, *“A conservação da natureza e da biodiversidade constitui também um motor de desenvolvimento local e regional, associado à identificação de caracteres próprios e distintivos que urge valorizar, através de uma atividade de gestão e aproveitamento sustentável dos recursos naturais, com o envolvimento e participação de toda a sociedade, numa lógica de benefício comum”*.

Assim, o desenvolvimento da Paisagem Protegida de Âmbito Local da Montanha da Penha visa proteger a biodiversidade, os valores culturais, artísticos e paisagísticos, bem como a presença harmoniosa do Homem e das suas atividades, de forma a alcançar uma gestão mais eficaz e eficiente dos recursos naturais e sua valorização (Fernandes *et al.*, 2019). A área da Montanha da Penha está sujeita a diversas medidas de proteção, ao nível da gestão do território municipal, pois é designada em inúmeras categorias na Carta de Planeamento do PDM (2015), encontrando-se classificada em diversas categorias: Espaços florestais de proteção, Espaços agrícolas, Espaços destinados a equipamentos e infraestruturas e Estrutura Ecológica Municipal, Nível I e II, Locais de interesse geológico, Sítio arqueológico, Património Edificado e Linhas de telecomunicações (Vieira *et al.*, 2019).

A área proposta para implementação da Paisagem Protegida Local tem uma dimensão de cerca de 362 ha (Figura 26) para a qual será implementado um novo regulamento e plano de gestão com o objetivo único de proteção e preservação da Paisagem Protegida da Montanha da Penha.

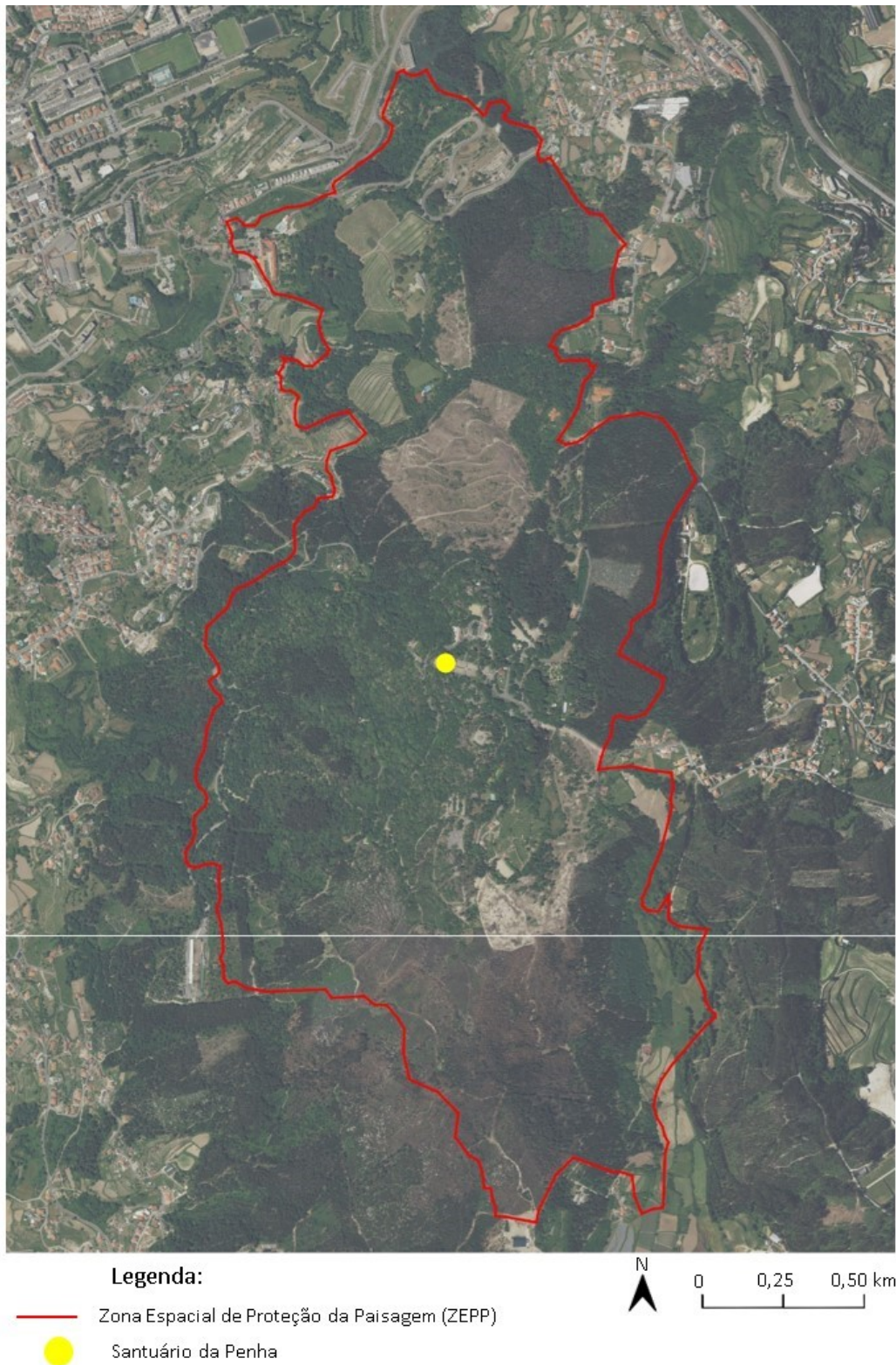


Figura 26 - Delimitação da área proposta para Paisagem Protegida Local (Fonte: Laboratório a Paisagem).

Como já referido anteriormente, esta área apresenta um elevado valor cultural, religioso, faunístico e florístico. Para além destes valores, esta área possui um elevado e diversificado número de elementos integrantes da geodiversidade com características geopatrimoniais, como sejam componentes geológicos, associados às rochas graníticas presentes, até elementos geomorfológicos, como as penhas, e elementos hídricos, como as minas de água da Montanha da Penha. A todos estes elementos podem ser acrescentados um conjunto de características de âmbito cultural e ecológico. Com efeito, o desenvolvimento de intensas relações entre as atividades humanas e o espaço da Montanha da Penha, nomeadamente as de cariz religioso e, mais recentemente, as de lazer, contribuíram para a construção de uma imagem multifacetada junto das populações, conferindo-lhe uma simbologia que ultrapassa a simples dimensão física e natural. A geodiversidade, em particular a geomorfologia, assume um novo significado e valorização neste ambiente, combinando dimensões culturais, religiosas, históricas e estéticas, além das suas características primordiais. Como resultado, os diversos elementos de geodiversidade que ocorrem na Montanha da Penha constituem importantes aspetos que valorizam a paisagem de diversas formas, para além do campo científico (Vieira *et al.*, 2019).

Assim sendo, com base no conhecimento já obtido da Montanha da Penha e em trabalhos anteriormente desenvolvidos (Oliveira, 2001; Pinto, 2011), considera-se a seleção de alguns dos elementos geomorfológicos, descritos de seguida.

A NW do santuário, localiza-se a Gruta do Ermitão, local onde é visível a litologia dominante na área, o granito de Guimarães (Figura 27).



Figura 27- Gruta do Ermitão: A - entrada da gruta; B - interior da gruta.

Um pouco mais acima, localiza-se a capela de São Cristóvão, com o Penedo suspenso, correspondente a um bloco arredondado suspenso entre dois megablocos (Figura 28). O encaixe processou-se gradualmente, em resultado da gravidade e da remoção (por erosão) do material rochoso de base (Fernandes *et al.*, 2019). Ao lado desta estrutura é possível observar o desfiladeiro labiríntico (Figura 28), que é uma fenda de grande espetacularidade, estreita e profunda, formada numa zona de caos de blocos e resulta da progressiva meteorização de uma fratura originada no período de solidificação do magma granítico (Fernandes *et al.*, 2019).



Figura 28- Geodiversidade observada próximo da Capela de S. Cristovão: à esquerda - Penedo suspenso; à direita - desfiladeiro labiríntico.

Um pouco abaixo do Santuário, próximo do teleférico, é possível observar a pseudoestratificação granítica (Figura 29). O fenómeno de "falsa estratificação" em rochas graníticas está relacionado com processos de descompressão crustal⁴ provocados por sucessivos eventos de erosão das rochas e do solo. A lascagem planar visível resulta de anisotropias petrográficas de pressão durante o processo de solidificação dos magmas graníticos (Silva & Gonçalves, 2019).

⁴ Descompressão crustal - diminuição de carga litostática



Figura 29- Pseudoestratificação granítica.

O “*penedo que abana*”, também designado em vários geoparques nacionais como “pedra bulideira”, é um bloco granítico de grandes dimensões, que se encontra em situação de instabilidade na superfície em que ocorre (Figura 30). Quando impulsionado em determinado ponto, o bloco balança.



Figura 30– “Penedo que abana”.

O miradouro do Pio IX, localizado a noroeste do Santuário da Penha, é um lugar de onde se observa toda a cidade de Guimarães, através de uma vista panorâmica, pois este é o ponto mais elevado da Montanha da Penha (613 metros). Neste sítio também se observam alguns blocos graníticos dispersos, bem como, outros elementos que exemplificam a geodiversidade local, como é o caso das pias graníticas (Figura 31). As pias graníticas são cavidades circulares ou ovalizadas que se formam em resultado do desgaste químico, induzido pela água, em alguns minerais como os feldspatos, a biotite e as plagioclases, bem visíveis na área de estudo (Silva & Gonçalves, 2019).



Figura 31– Geofomas observadas no miradouro do Pio IX: a - blocos graníticos dispersos; b - pias graníticas (P).

Também, as minas de água da montanha da Penha, são um importante património a preservar, pelo seu valor histórico, geológico, assim como, pelo importante contributo que estas apresentam em termos de fornecimento de água à cidade de Guimarães. Nestas minas, para além de ser possível observar o fluxo da água, pode-se visualizar alguma biodiversidade, a qual foi objeto de estudo do Plano de Ação da Biodiversidade de Guimarães (Figura 32). Nestas observam-se principalmente anfíbios, destacando-se a salamandra-lusitânica (*Chioglossa lusitanica*) uma espécie protegida pela Diretiva Habitats (92/43/CEE) (Laboratório da Paisagem, 2022).



Figura 32- Biodiversidade observada no interior das minas de água subterrânea da Montanha da Penha; A- rã ibérica (*Rana iberica*); B- salamandra de pintas amarelas (*Salamandra salamandra*).

Atualmente, a criação de áreas protegidas, em Portugal, tem ocorrido fundamentalmente com objetivos de proteção e preservação dos elementos bióticos e, nalguns casos, de manutenção de práticas culturais ancestrais, raramente prestando grande consideração pelos elementos abióticos, constituintes da geodiversidade. A proposta que tem vindo a ser desenvolvida pelo Município de Guimarães, de constituir na área da Montanha da Penha uma área de Paisagem Protegida Local, parte do pressuposto de considerar os elementos geopatrimoniais como fatores relevantes para a sua valorização, estando claramente incluídos nos seus objetivos e ações específicas a desenvolver.

5. Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho decorreu de forma faseada, seguindo uma orientação com vista a atingir os objetivos propostos definidos para o património hidrogeológico da Montanha da Penha. As várias fases de desenvolvimento do trabalho encontram-se representadas na Figura 33.

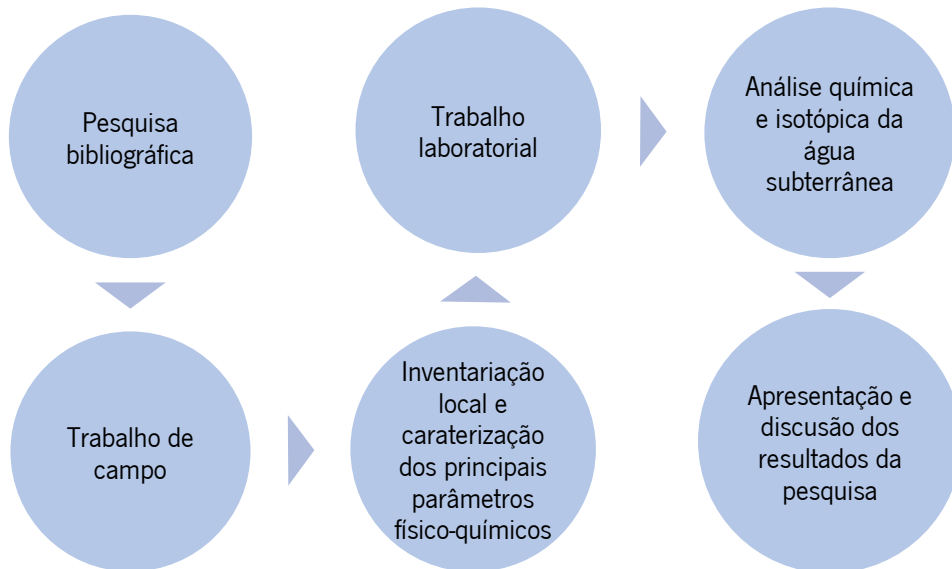


Figura 33- Metodologia do trabalho desenvolvido.

Numa fase inicial, procedeu-se à realização da pesquisa e recolha de dados bibliográficos e documentais relativos à área em estudo. Com esta etapa, procedeu-se a uma caracterização detalhada da área de estudo, incluindo diversos aspetos como a geografia, geologia e geomorfologia, hidrologia e hidrogeologia e clima, bem como, o uso do solo e referência ao desenvolvimento ambiental e sustentável colocado em prática na cidade e pelos cidadãos de Guimarães, bem como, expor a candidatura a paisagem protegida de âmbito local da Montanha da Penha, que está em desenvolvimento.

5.1. Definição dos pontos de amostragem

A definição dos pontos de amostragem de água subterrânea no sistema hidrogeológico da Montanha da Penha incluiu a realização de trabalhos de campo, com o reconhecimento e inventariação local das minas de água que compõem este sistema hídrico. No total foram identificados 40 pontos de água subterrânea, localizados nas imediações do Santuário da Penha, os quais se localizam maioritariamente na encosta nordeste da Montanha da Penha (Figura 34). Refere-se, ainda, a localização do ponto de água referido por “*Urna*” correspondente ao ponto de recolha de água subterrânea, localizado no final da encosta nordeste da Montanha da Penha, a partir do qual a Empresa Vimágua – EIM, S.A encaminha as águas

das minas da Montanha da Penha para o reservatório Minas da Penha - São Roque para posterior distribuição da água pela cidade de Guimarães.

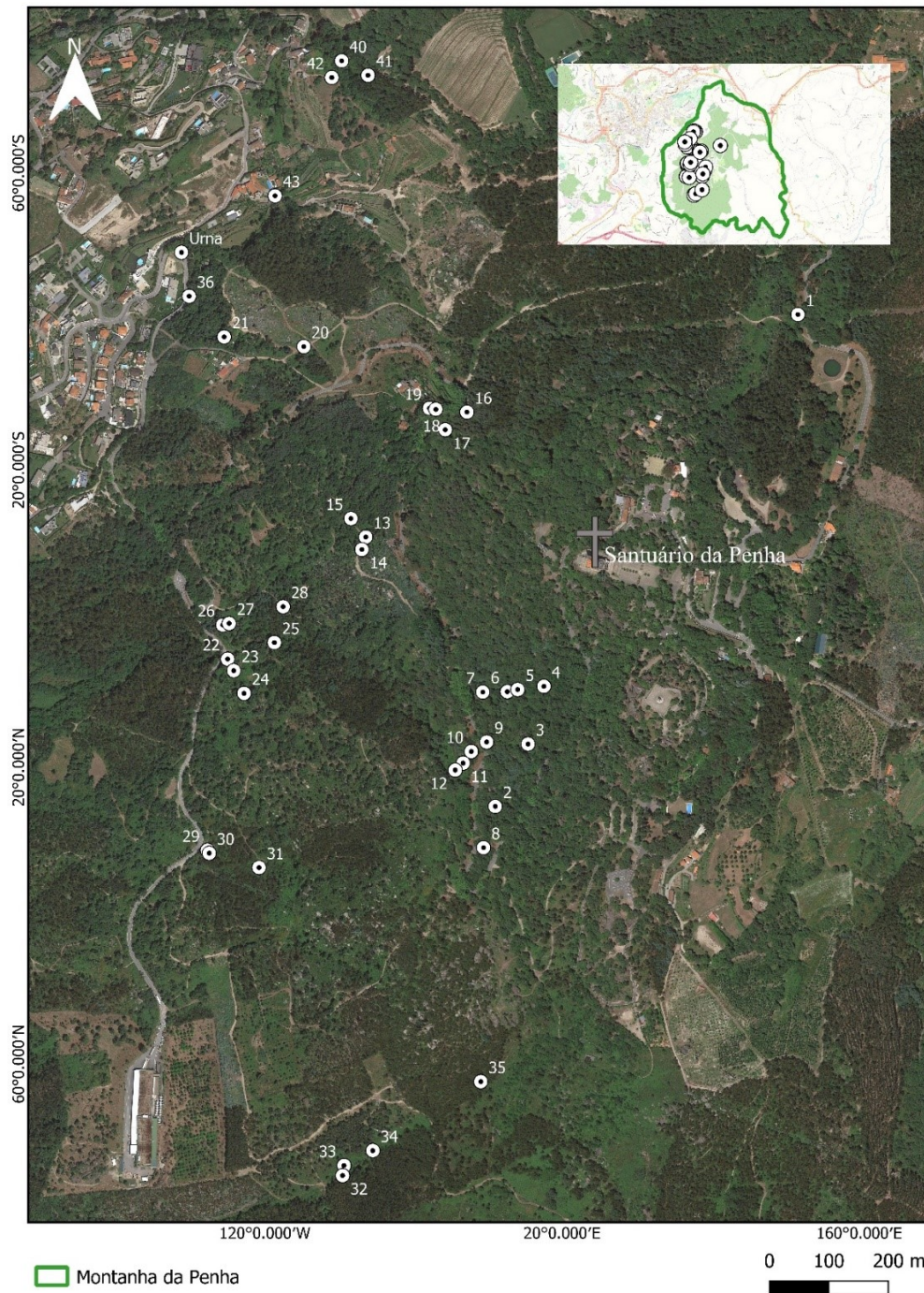


Figura 34- Localização espacial dos pontos de água do sistema hidrogeológico da Montanha da Penha.

A distribuição espacial dos pontos de água e a sua referência numérica está de acordo com as minas de água definidas pela Empresa Vimágua – EIM, S.A. Neste sistema hídrico a água circula entre as várias minas as quais se ligam através de galerias subterrâneas (Figura 35), nas quais a água circula, pela ação

da força da gravidade, em tubagens que transportam a água até um pequeno reservatório, o qual armazena uma certa quantidade de água até atingir a altura necessária de um outro tubo, no qual a água entra e é transportada para outra mina de água (Figura 36).



Figura 35- Exemplo de galerias por onde a água do sistema de minas de água da Montanha da Penha circula (mina 4 na esquerda e mina 8 na direita).

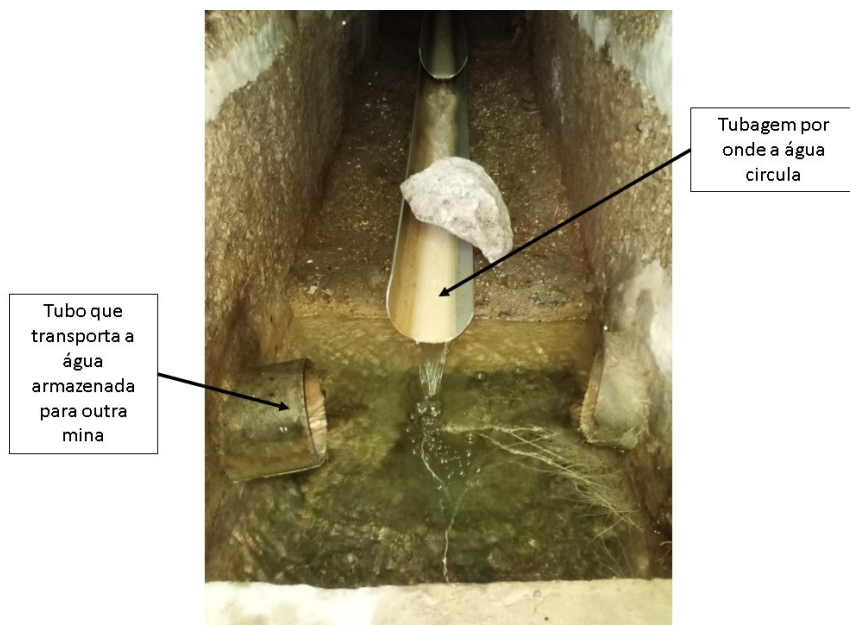


Figura 36 - Esquema demonstrativo de como a água é transportada entre as minas que compõem este sistema hídrico

Nem todas as minas têm o mesmo aspeto exterior, pois muitas estão inseridas na paisagem, parecendo estar “camufladas”, enquanto outras têm um aspeto de “capela” (Figura 37).



Figura 37- Minas de água da Penha “camufladas”, parecendo um elemento natural da paisagem da Montanha da Penha (em cima); minas de água da Penha com um aspeto de “capela” (em baixo).

5.2. Determinação de parâmetros “*in situ*” e laboratoriais

Para cada ponto de água subterrânea procedeu-se à determinação dos parâmetros físico-químicos “*in situ*”, incluindo a Temperatura, pH, Condutividade Elétrica, Total de Sólidos Dissolvidos e Potencial Oxidação- Redução, bem como, a medição do caudal instantâneo. A caracterização espacial deste sistema hidrogeológico incluiu dois períodos temporais, entre os dias 27 de novembro e 3 de dezembro de 2021 e entre os dias 7 e 9 de junho de 2022, de forma a avaliar a variabilidade temporal entre o período de maior (novembro 2021 e dezembro 2022) e de menor precipitação (junho 2022), respetivamente. Destes pontos, os referenciados por 10, 23 e 24 estavam secos em ambas as campanhas realizadas, enquanto que os referenciados por 40 e 41 estavam inacessíveis e o ponto de água 43 localiza-se numa propriedade privada.

A medição dos parâmetros físico-químicos “*in situ*” foi obtida com o equipamento multi-paramétrico Hanna HI 9828, e pontualmente com os equipamentos HI 98129 (determinação da Condutividade Elétrica, Total de Sólidos Dissolvidos e Temperatura), HI 98120 (para o potencial de oxidação-redução) e HI 991300 (medição do pH; Figura 38).



Figura 38 - Medição “in situ” dos parâmetros físico químicos da água subterrânea

A determinação do caudal foi realizada de uma forma expedita e no local, recorrendo-se a um reservatório de volume conhecido e a um cronómetro, tendo sido determinado o intervalo de tempo que este volume de água atravessa a secção de saída da mina (Figura 39). Para cada ponto de água foram repetidas três a quatro medições do intervalo de tempo e os resultados de caudal apresentado referem-se ao valor médio obtido.



Figura 39- Medição do caudal durante a segunda campanha de campo.

No total dos 40 pontos de água subterrânea identificados, foram seleccionados dezasseis pontos de água para recolha de amostra de água e posterior análise laboratorial (Figura 40). Nestes pontos de água espacialmente distribuídos pela área de estudo, foram recolhidos cerca de 1 L de água em garrafas de polietileno, previamente descontaminadas com HNO_3 1:1, e devidamente acondicionadas e transportadas para o laboratório de Natureza e Biodiversidade no Laboratório da Paisagem (Guimarães).

A realização desta colheita de amostras de água subterrânea decorreu na segunda campanha de campo, entre 7 e 9 de junho de 2022, prevendo-se representar o período de menor precipitação ocorrida.



Figura 40- Pontos de água selecionados do sistema hidrogeológico da Montanha da Penha para análise química e isotópica, no qual estão demarcadas as áreas consoante o uso e ocupação do solo que apresentam.

As amostras de água foram previamente sujeitas a tratamento laboratorial, realizado no Laboratório da Paisagem, de acordo com o esquema da Figura 41.

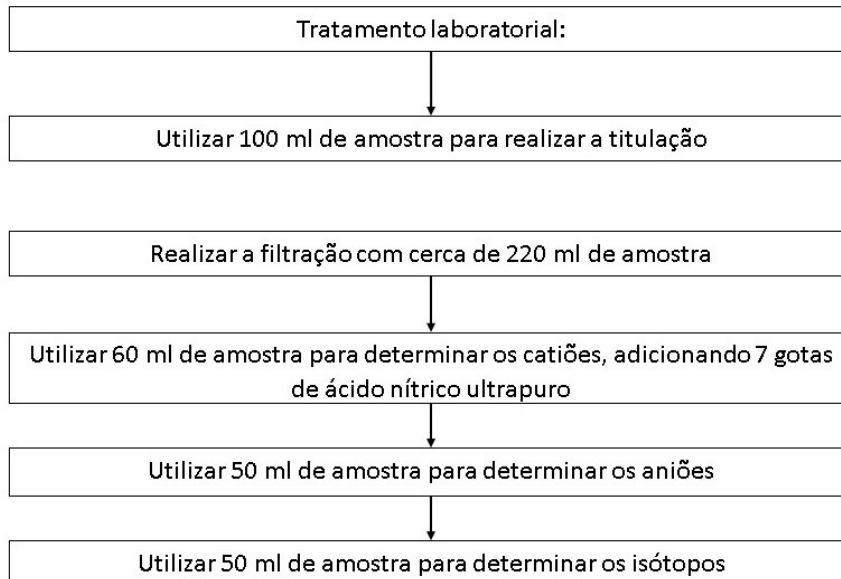


Figura 41- Esquema do procedimento laboratorial.

Assim, procedeu-se à determinação da alcalinidade da água utilizando uma titulação ácido-base, em que o ácido clorídrico (HCl – 0,001 M) é o titulante e a amostra de água, constitui o titulado (Figura 42).



Figura 42- Representação laboratorial da determinação da alcalinidade de uma amostra de água.

Para tal, foram utilizados 100 mL de amostra de água, à qual se adicionaram 3 a 4 gotas de indicador misto vermelho metil e verde bromocresol. Em seguida, regista-se o volume inicial de ácido clorídrico (HCl), sendo adicionado gota a gota até se atingir o ponto de viragem, que consiste na alteração da coloração da amostra de água para um tom rosado. Quando atingida esta coloração, é registado o volume final de ácido clorídrico utilizado. Terminada a titulação, procede-se ao cálculo da alcalinidade em carbonato de cálcio (CaCO₃) através da seguinte fórmula:

$$\text{Alcalinidade total (mg/L)} = \frac{VF(\text{mL}) * |\text{HCl}|(\text{mol/L})}{Va(\text{mL})} * \frac{MM(\text{CaCO}_3)}{2} * 10^3$$

em que VF é o volume de titulante utilizado (calculado através da subtração do volume final de HCl utilizado menos o volume inicial de HCl: $V_{f(\text{HCl})} - V_{i(\text{HCl})}$), Va é o volume de amostra de água, |HCl| é a concentração em moles do titulante e MM(CaCO₃) é a massa molar do carbonato de cálcio.

Seguidamente, as amostras de água foram filtradas, usando cerca de 220 mL, utilizando filtros de membrana de acetato de celulose (tamanho de 0,45 µm), um funil de filtração e um kitasato, ao qual foi acoplada uma bomba de vácuo (Figura 43). Ao filtrar as amostras de água, a maioria das partículas em suspensão são retiradas da água, pelo que será minimizada a sua interferência nos resultados analíticos da fase dissolvida.

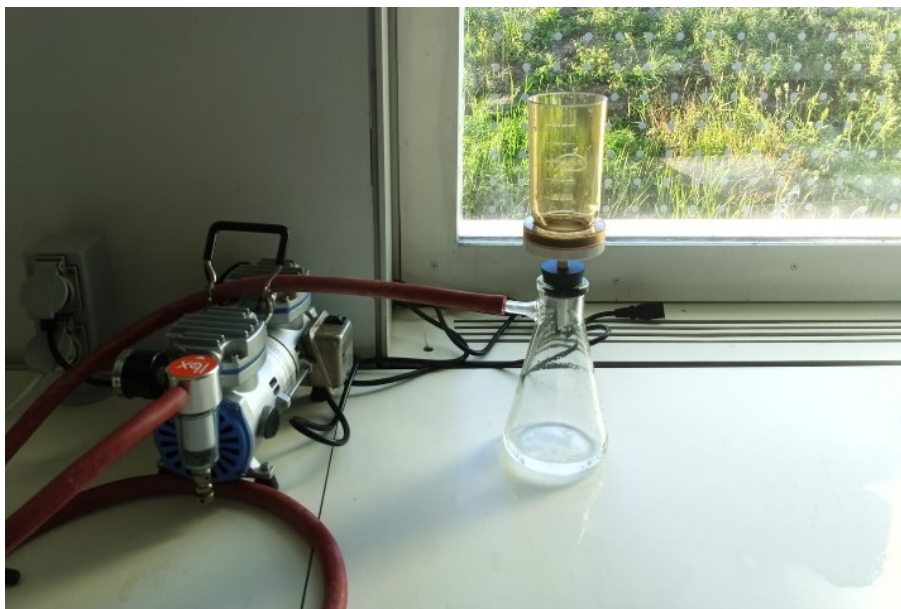


Figura 43- Representação laboratorial do procedimento efetuado na filtração das amostras de água

Após a filtração das amostras de água são preparadas três subamostras, uma primeira para a determinação dos cátions (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Si^{4+}) e para a componente vestigiária (Sr^{2+} , As^{3+} , B^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Li^+) à qual são adicionadas 7 gotas de ácido nítrico ultrapuro 69 %. Seguidamente, é preparada uma segunda subamostra, em que são colocados 50 mL de amostra de água para a determinação dos aniões e, uma terceira subamostra, com 20 mL de amostra para determinação dos isótopos ambientais. As três subamostras preparadas para cada ponto de amostragem foram analisadas no Laboratório de Geoquímica e Hidrogeologia da Faculdade de Geociências da Universidade de Bremen (Alemanha).

A determinação dos aniões dissolvidos na água foi obtida por cromatografia iônica, com recurso ao equipamento Metrohm 883 Basic IC plus, enquanto os cátions foram determinados por espectrometria de emissão atômica ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), com o equipamento *Perkin Elmer Optima 7300 DV*. As razões isotópicas para o deutério ($\delta^2\text{H}$) e oxigénio 18 ($\delta^{18}\text{O}$) foram determinadas por espectroscopia de absorção a laser, com o equipamento *DLT-100*.

Esta caracterização detalhada do sistema hidrogeológico envolve a análise e interpretação detalhada dos resultados obtidos, recorrendo ao QualiGraf (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME, 2015), um software de utilização gratuita, o qual permitiu a representação dos diagramas de classificação e variação da composição química da água, e o QGIS (QGIS Development Team, 2002) na distribuição espacial dos pontos de água e sua variabilidade, através de diversos mapas, sendo também uma ferramenta importante no desenvolvimento do Modelo Digital do Terreno utilizado para a elaboração do Modelo Concetual da água subterrânea da Montanha da Penha.

A utilização do Excel (Microsoft Corporation, 2007) e as suas várias funcionalidades (e.g. gráficos, tabelas, fórmulas) é um recurso utilizado de forma constante ao longo de todo o trabalho.

6. Resultados

Neste capítulo são apresentados e interpretados os resultados obtidos nas amostras de água analisadas nas duas campanhas de campo. No primeiro ponto será apresentada a caracterização hidrodinâmica, com a qual se pretende descrever e compreender o fluxo, a circulação e armazenamento da água que percorre este sistema hídrico. Para tal, será apresentada inicialmente uma descrição do caudal que é conduzido para o Reservatório de Minas da Penha - São Roque e, posteriormente, encaminhado para os reservatórios de Urgezes e Mãe D' Água, no período entre o início de 2021 e junho de 2022.

Seguidamente, serão apresentados os resultados dos parâmetros físico-químicos determinados “*in situ*” e em laboratório, com análise da respetiva variação temporal. Posteriormente, será apresentada a caracterização isotópica, através dos isótopos ambientais de oxigénio e deutério (^{18}O e ^2H). Com este estudo será possível identificar a possível origem da água do sistema aquífero da Montanha da Penha, bem como, identificar potenciais processos de mistura entre diferentes águas, reconhecer possíveis direções de fluxo (Clark e Fritz, 1997) e estimar a altitude de recarga da água subterrânea que circula neste sistema hídrico.

6.1. Caracterização Hidrodinâmica

A hidrodinâmica estuda o movimento da água em condições de laboratório consideradas como “ideais”, utilizando exclusivamente técnicas e pressupostos matemáticos. No entanto, os ambientes hidrogeológicos são mais ambíguos do que as circunstâncias ideais laboratoriais em termos da qualidade hidráulica e das características numéricas dos parâmetros, tornando-os mais idênticos com situações do mundo real do que com condições laboratoriais perfeitas (Lima, 2001). Assim, este estudo visa caracterizar o fluxo e armazenamento de água subterrânea, bem como, uma gestão eficaz da quantidade e qualidade da água em ambiente subterrâneo.

Na região em estudo domina o granito de Guimarães, correspondente a um meio fraturado de permeabilidade média, frequentemente do tipo fissural, no qual a capacidade aquífera está diretamente relacionada com a densidade da rede de fraturas, falhas, diaclases e filões de quartzo.

O estudo hidrodinâmico tem como objetivo efetuar uma caracterização hidráulica da região, através do estudo do caudal mensal registado nos reservatórios de água que circula neste sistema hídrico, entre os anos de 2021 e parte de 2022 (até junho), e do estudo do caudal registado em cada mina de água nas duas campanhas de campo realizadas. Este tratamento permite estimar a produtividade deste sistema hídrico.

6.1.1. Caudal das minas de água da Montanha da Penha

A maioria da água que circula no conjunto de minas de água subterrânea da montanha da Penha é encaminhada para o reservatório das Minas da Penha - São Roque, principalmente as minas localizadas na encosta noroeste desta montanha. Porém, na encosta nordeste localiza-se a mina 1 (Figura 34), também designada como “*mina do cavalo*”. Do reservatório Minas da Penha - São Roque, a água é conduzida para outros reservatórios distintos, o de Urgezes e a Mãe d' Água, na região de Azurém. Na Tabela 1 apresentam-se as respetivas percentagens que cada reservatório fornece às freguesias do concelho de Guimarães. Na Figura 44 é apresentada a distribuição do caudal deste sistema hídrico pelos reservatórios que abastece, entre o início de 2021 e junho de 2022.

Tabela 1- Percentagem de água que cada reservatório fornece às freguesias de Guimarães.

Reservatório Mina Penha - S. Roque	
Costa	70 %
Urgezes	10 %
Reservatório Mãe d'Água + Urgezes	
Aldão	50 %
Costa	30 %
Mesão Frio	75 %
Oliveira do Castelo	100 %
Urgezes	90 %
Nespereira	100 %
Pinheiro	100 %
Polvoreira	100 %
Abação e Gémeos	100 %
Candoso S. Tiago	60 %
Mascotelos	80 %
Serzedo e Calvos	100 %
Tabuadelo e S. Faustino	100 %
Reservatório Mina Penha – Cavalo	
Infantas	100 %
Mesão Frio	25 %

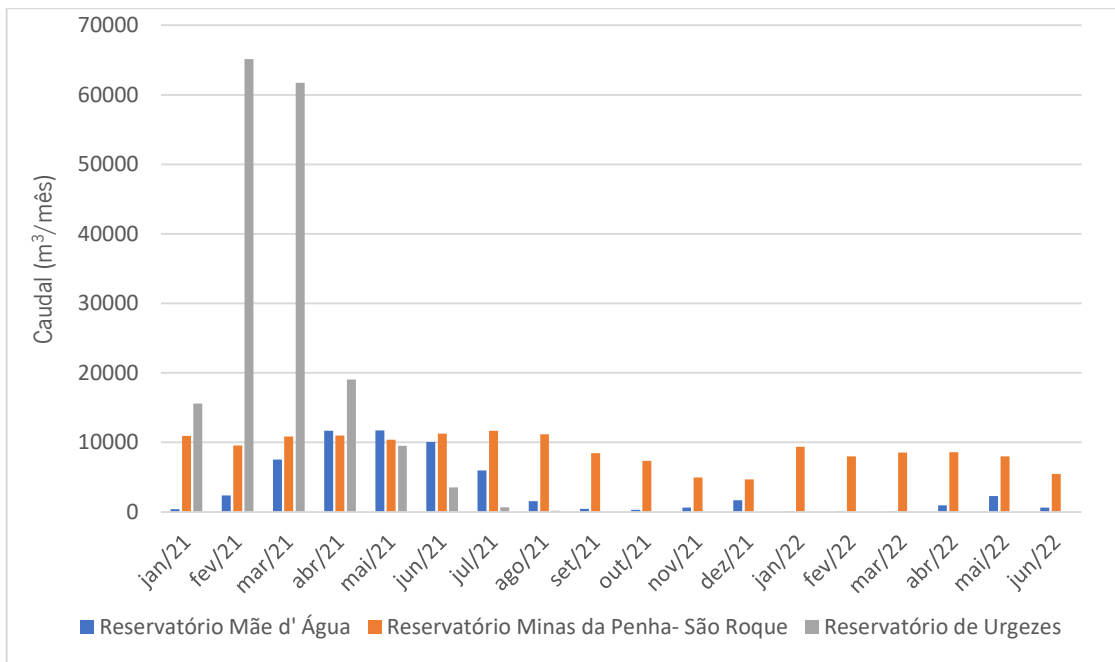


Figura 44- Distribuição da água após chegada ao reservatório Minas da Penha- São Roque pelos diferentes reservatórios.

A partir da Figura 44 é perceptível que no início de 2021, principalmente nos meses de fevereiro, março e abril, a maioria da água que é encaminhada para o reservatório de minas de água da Penha - São Roque foi distribuída para o reservatório de Urgezes, com uma quantidade mais reduzida para o Reservatório Mãe d'Água e uma outra para o reservatório das Minas da Penha - São Roque, a qual é distribuída pelas freguesias da Costa e Urgezes (Tabela 1). Posteriormente, e até junho de 2022, observa-se que a quantidade de água que este reservatório apresenta é maioritariamente retida no reservatório das Minas da Penha - São Roque, e distribuída pelas freguesias referidas, sendo uma pequena parte encaminhada para o Reservatório Mãe d' Água.

De modo a compreender melhor a quantidade de água que chega ao reservatório de Minas da Penha - São Roque apresenta-se a variação temporal do caudal neste reservatório, entre o início do ano de 2021 e junho de 2022 (Figura 45).

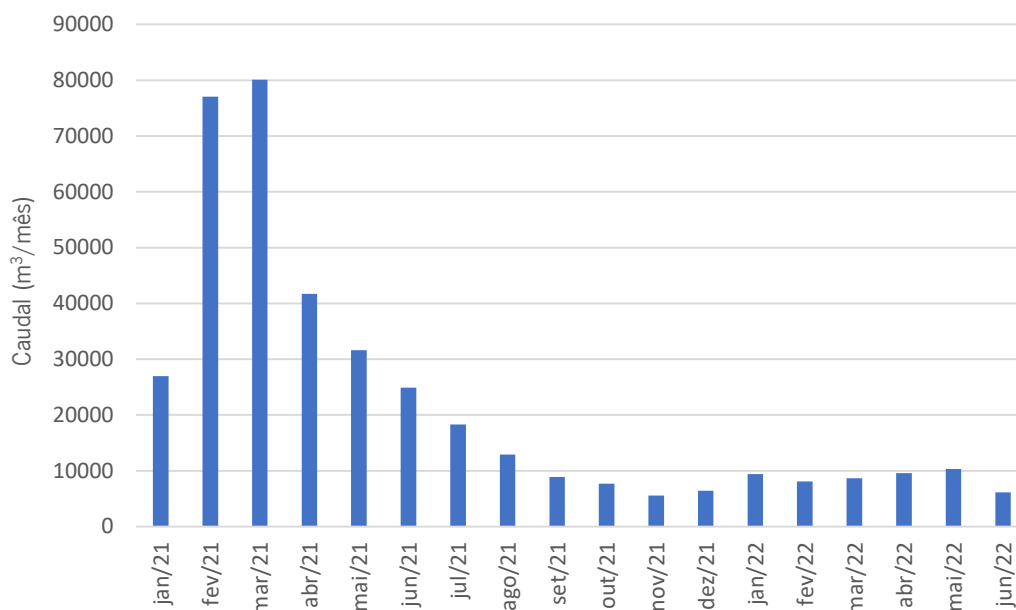


Figura 45- Distribuição da água após chegada ao reservatório Minas da Penha- São Roque pelos diferentes reservatórios.

Através da Figura 45 é perceptível que os meses de fevereiro e março de 2021 foram os que registaram maior produtividade, havendo em seguida um decréscimo acentuado até novembro de 2021, observando-se um ligeiro aumento no mês seguinte. Já no ano de 2022, observa-se que os valores de caudal se mantêm relativamente estáveis abaixo dos 10 000 m³/mês exceto no mês de maio, em que o valor foi ligeiramente superior (10 313,75 m³/mês).

6.1.2. Variação do Caudal

De modo a compreender o contributo que cada mina de água da Montanha da Penha tem para o abastecimento público do concelho de Guimarães realizou-se o estudo estatístico dos valores de caudal registado (Tabela 2; Anexo 2). A Figura 46 representa a variação temporal do caudal registado durante o período em que decorreu o estudo.

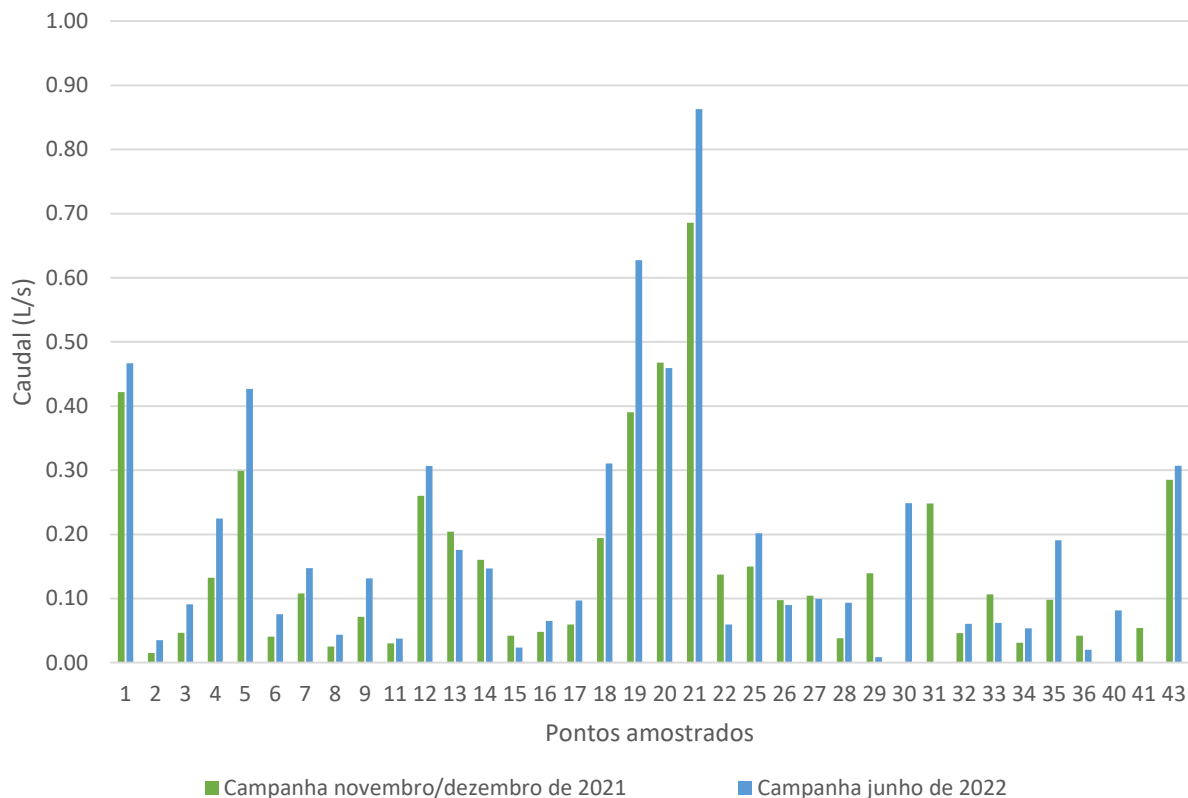


Figura 46– Variação do caudal nas minas de água da Montanha da Penha

Tabela 2 - Dados estatísticos dos valores do caudal (L/s) dos pontos amostrados.

Caudal (L/s)	Novembro e dezembro de 2021	Junho de 2022
Média	0,16	0,19
Mediana	0,11	0,10
Mínimo	0,02	0,01
Máximo	0,69	0,86
Desvio Padrão	0,15	0,19
Coefficiente de variação (%)	96,4	101,5
Número de determinações	34	34

Os dados indicam que, na maioria das minas de água, houve um aumento do caudal da água que circula neste sistema hídrico entre as campanhas realizadas. Constata-se ainda, que a mina que apresenta um maior contributo quantitativo, ou seja, apresenta um maior caudal, tanto na campanha de novembro e dezembro de 2021, como na campanha de junho de 2022, é a mina 21, apresentando o caudal máximo (0,69 L/s e 0,89 L/s, respetivamente). Por outro lado, as minas de água que menos contribuíram para o abastecimento público da cidade de Guimarães são as minas 2 e 8, apresentando o caudal mínimo (0,02 L/s) entre novembro e dezembro de 2021 (Tabela 2), assim como a mina 29 com o caudal mínimo

(0,01 L/s) em junho de 2022 (Tabela 2). Esta variação poderá estar relacionada com a recarga de água que ocorreu durante a estação húmida, através da precipitação, apesar dos níveis de precipitação registados terem sido muito reduzidos (Figura 20).

Para classificar a produtividade do sistema hídrico recorreu-se à classificação de Meinzer (in TODD, 1980), sendo consideradas 8 classes de acordo com o valor médio do caudal registado. A grande maioria das minas de água da Montanha da Penha classificam-se com magnitude média a baixa e de 6^a a 7^a ordem (Tabela 3).

Tabela 3 - Classificação das captações segundo o valor médio do caudal obtido (Meinzer in Todd, 1980).

Classe		Caudal médio (L/s)	Número de minas pertencentes à classe	
Ordem	Magnitude		nov/dez 2021	jun 2022
1 ^a	Elevada	> 10 000	-	-
2 ^a		1 000 - 10 000	-	-
3 ^a		100 - 1 000	-	-
4 ^a	Média	10 - 100	-	-
5 ^a		1- 10	-	-
6 ^a		0.1- 1	18	16
7 ^a	Baixa	0,01 - 0,1	16	18
8 ^a		< 0,01	-	-

A partir da Tabela 3 é possível concluir que a maioria dos pontos de amostragem, o caudal apresenta uma magnitude média a fraca, sendo que, em novembro e dezembro de 2021, a maioria dos pontos apresenta uma magnitude média, enquanto em junho de 2022, uma magnitude baixa. Como a média das duas campanhas de amostragem é de 0,17 L/s, este sistema hídrico apresenta uma magnitude de produtividade hídrica média.

6.2. Caraterização Hidroquímica

Segundo autores Freeze & Cherry (1979) e Fetter (2001), a compreensão dos processos hidrogeocímicos é crucial para a caraterização dos sistemas hidrogeológicos. Estes estudos são importantes, pois permitem obter conhecimento sobre uma variedade de fatores que compõem um sistema hidrogeológico, incluindo: a recarga do sistema aquífero, o tipo de solos e rochas por onde a água circula, como a água interage quimicamente com as rochas, a definição das linhas de fluxo subterrânea, entre outros.

As águas naturais nunca são completamente puras; apresentam quase sempre, alguma quantidade de sais ou gases dissolvidos. A composição inicial da água, a pressão parcial da fase gasosa, a composição da matéria mineral em contacto com a água, o pH e o potencial de oxidação-redução da água, são algumas das variáveis que afetam a composição das soluções aquosas (Fetter, 2001).

A interação de várias fontes, incluindo a dissolução de gases do ar, dissolução de gases do solo, erosão de solos e rochas e reações químicas que ocorrem abaixo da superfície da Terra, contribuem para a composição de uma água subterrânea (Heath, 1983; Hem, 1985). A presença ou ausência de cobertura vegetal também determina uma maior ou menor pressão parcial de CO₂ dissolvido no sistema, contribuindo fortemente para a composição da água subterrânea (Carvalho, 2013).

A água subterrânea contém sais dissolvidos, dissociados em cátions e aniões. Os iões maioritários ocorrem em concentração superior a 1 mg/L nas águas naturais, sendo os cátions dissolvidos: o sódio (Na⁺), o cálcio (Ca²⁺), o magnésio (Mg²⁺) e o potássio (K⁺) e os aniões: o cloro (Cl⁻), o bicarbonato (HCO₃⁻) e o sulfato (SO₄²⁻) (Fetter, 2001; Mazor, 2004). A sílica (SiO₂), substância não-iônica, é também considerada um componente maioritário (Fetter, 2001).

A interação, tanto qualitativa quanto quantitativa, da origem das características e constituintes físico-químicos de uma água subterrânea é direcionada à caracterização: (1) da origem do próprio fluido e (2) das fontes, dos processos (interação água- meio) e dos fatores de incorporação e evolução dos elementos que constituem o corpo hídrico (Azevedo, 1998).

Esta seleção teve por base a sua distribuição espacial, de forma que permita abranger todo o sistema hídrico da Montanha da Penha, incluindo zonas habitacionais (caso das minas de água 36, 40 e 43) e zonas agrícolas (embora não apresente uma agricultura intensiva mas sim de consumo próprio, o caso das minas 22 e 25), pretendendo-se com esta análise conhecer melhor o quimismo da água que circula neste sistema, assim como a interação água - rocha.

Para cada parâmetro físico – químico (Anexo 3, Anexo 4) é apresentada uma breve descrição quanto à sua influência na água subterrânea, passando seguidamente a apresentar a representação gráfica da variação temporal e como esta influência o sistema hídrico em estudo e o tratamento estatístico, agrupado numa tabela.

Após a descrição e discussão dos resultados obtidos para cada parâmetro físico- químico foram ainda acrescentados os valores paramétricos que a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2017) sugere para a água para consumo humano, bem como os valores que são apresentados na legislação Portuguesa, segundo o Decreto-Lei n° 306/2007 de 27 de Agosto, de modo a concluir se a água que circula neste sistema hídrico se enquadra nos padrões de qualidade para consumo humano.

6.2.1. Temperatura

Com exceção dos aquíferos pouco profundos, cuja temperatura da água é igual ou ligeiramente superior à temperatura atmosférica média anual registada no local, a variação da temperatura da água subterrânea é reduzida (Custodio & Llamas, 1983; Hem, 1985), na ordem de 1 a 2°C (Feitosa & Filho, 2000), com exceção do caso das águas termais, em que a variação da temperatura pode ser naturalmente elevada. A temperatura afeta a viscosidade da água e a capacidade de absorção de gases (Custodio & Llamas, 1983), bem como a solubilidade e a mobilização de elementos químicos (Siegel, 2002). Valores de temperatura da água mais elevados promovem um aumento das substâncias dissolvidas e, conseqüentemente, a condutividade elétrica aumenta (Carvalho, 2004).

Na Figura 47 apresentam-se os valores obtidos em cada ponto de amostragem de água nas duas campanhas de campo, com um resumo dos parâmetros estatísticos na Tabela 4.

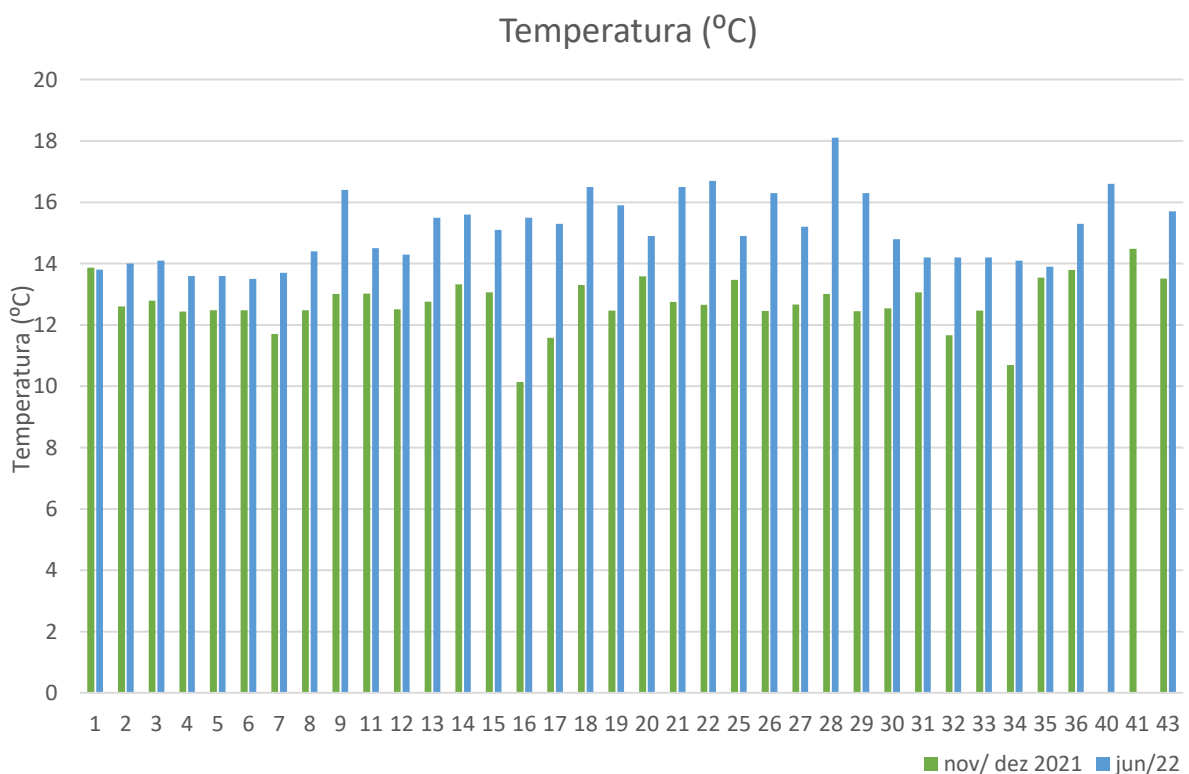


Figura 47- Variação da temperatura nas minas de água da Montanha da Penha.

Tabela 4 - Dados estatísticos para os valores de temperatura da água (°C) dos pontos amostrados.

	novembro e dezembro de 2021	junho de 2022
Mínimo	10,14	13,5
Máximo	14,48	18,1
Média	12,71	15,06
Mediana	12,67	14,9
Desvio Padrão	0,83	1,11
Coefficiente de Variação (%)	6,54	7,39
Nº de determinações	35	35

A temperatura da água registada em junho de 2022 é superior à temperatura da água em novembro e dezembro de 2021, com temperaturas médias de 15,06 °C e 12,71 °C, respetivamente (Tabela 4). Este aumento de temperatura, deve-se principalmente ao período em que cada campanha se realizou, a primeira colheita decorreu no final do outono, época em que a temperatura ambiente é mais baixa, enquanto a colheita de junho de 2022, decorrida no final da primavera, regista uma temperatura ambiente mais elevada. A temperatura da água é suscetível a variações sazonais, sugerindo que são águas de infiltração recente (Mendes *et al.*, 2008).

Segundo Pulido Carrillo (1978), as águas frias estão abaixo de 16 °C, as águas normais estão entre 16 e 22 °C e as águas quentes estão acima de 22 °C (Tabela 5).

Tabela 5 - Classificação das águas quanto à temperatura segundo Pulido Carrillo (1978).

Classificação das águas	
Águas frias	< 16 °C
Águas normais	16 °C - 22 °C
Águas quentes	> 22 °C

Deste modo, como as temperaturas das águas subterrâneas deste conjunto de minas de água variam entre 10,4 °C (novembro e dezembro de 2021) e 18,1°C (junho de 2022) (Figura 47; Tabela 4), estas águas classificam-se como frias a normais, demonstrando este intervalo de variação que a temperatura da água subterrânea é fortemente afetada pela temperatura atmosférica. A temperatura da água registada em novembro e dezembro de 2021, corresponde ao intervalo das águas frias enquanto na campanha de campo de junho de 2022, a variação da temperatura é distinta, sendo classificadas como águas frias a normais (Tabela 5). Este último intervalo de variação registado pode justificar-se através das variações climáticas registadas na área de estudo, dado que a temperatura média do ar variou de

dia para dia, com pequenos intervalos de precipitação registados no segundo dia de campo. Por outro lado, entre o final de novembro e início de dezembro de 2021, a temperatura média do ar foi relativamente constante e a precipitação registada bastante reduzida.

6.2.2. pH

O pH reflete a concentração de hidrogénio na água ($\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$), o qual é determinado por reações químicas e pelo equilíbrio químico de iões. Os valores de pH são determinados pela passagem da água pelas rochas, bem como pela presença de CO_2 na atmosfera ou outros gases dissolvidos.

Segundo Rogers (2003), a medição do pH é essencial em todos os estudos hidrológicos, uma vez que a modelação hidrogeológica depende do comportamento do pH e a sua interferência nos processos de interação água-rocha.

A natureza ácida, neutra ou alcalina de uma solução deve ser avaliada em função da temperatura que apresenta, uma vez que varia com a temperatura, pois o comportamento dos iões de hidrogénio é fortemente afetado pela temperatura (Hem, 1985).

Na Figura 48 apresentam-se os valores de pH da água obtidos nas duas campanhas de campo e na Tabela 6 o resumo dos parâmetros estatísticos.

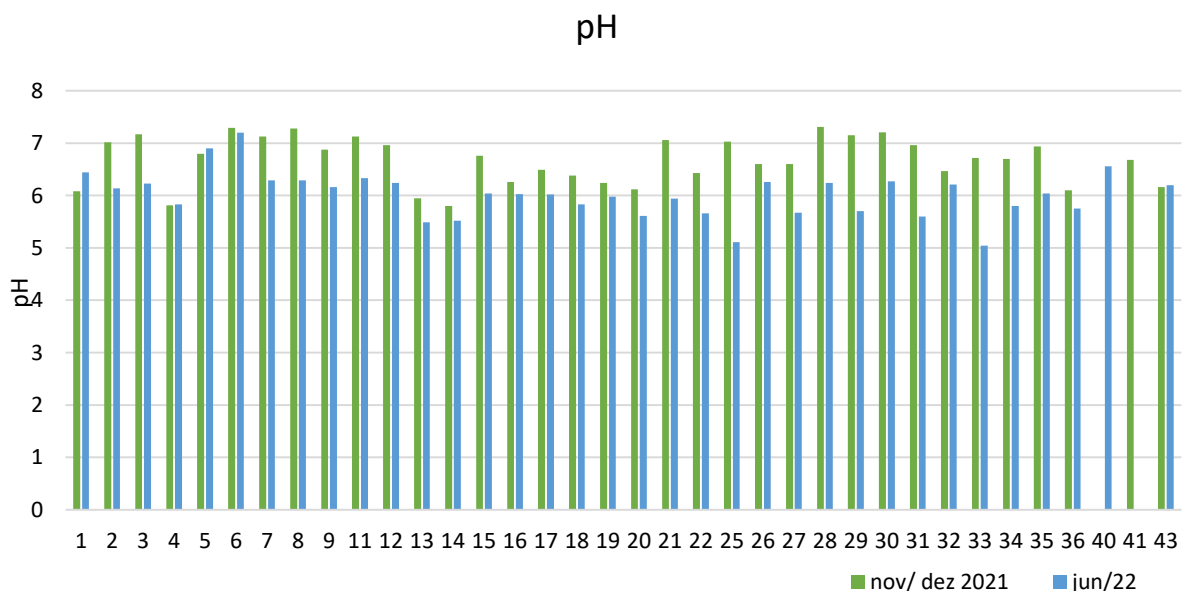


Figura 48- Variação do pH nas minas de água da Montanha da Penha.

Tabela 6 - Dados estatísticos dos valores do pH dos pontos amostrados.

pH	novembro e dezembro de 2021	junho de 2022
Mínimo	5,80	5,04
Máximo	7,31	7,20
Média	6,68	6,04
Mediana	6,72	6,04
Desvio Padrão	0,44	0,44
Coefficiente de Variação (%)	6,66	7,22
Número de determinações	35	35

A partir da Figura 48 é possível observar que, na maioria dos pontos de água, o valor de pH é mais elevado na campanha de novembro e dezembro de 2021, em relação à campanha de junho de 2022, sendo notória a diminuição do valor entre campanhas, apresentando um valor de pH médio de 6,68 e 6,04, respetivamente (Tabela 6).

A água subterrânea na área de estudo é moderadamente ácida a neutra, com valores de pH a variar entre 5,04 a 7,31 (Figura 48; Tabela 6). Os valores mais baixos de pH observados são comuns em águas subterrâneas de aquíferos graníticos pouco profundos (Puga, 2016). O ligeiro carácter ácido desta água reflete um potencial, ainda que de forma reduzida, interação da água com o meio em que circula, neste caso o maciço granítico enriquecido em sílica (Mendes *et al.*, 2008).

6.2.3. Condutividade elétrica

A condutividade elétrica define a aptidão que a água apresenta para conduzir corrente elétrica e corresponde à quantidade de eletricidade transportada pela água entre dois elétrodos paralelos de 1 cm² de secção e separados de 1 cm, sob a diferença de potencial de 1 volt (Custódio & Llamas, 1996; Hudak, 2001).

Este parâmetro permite avaliar o grau de mineralização da água, o qual resulta da relação entre a concentração de sais minerais dissolvidos na água e a resistência que esta oferece à passagem de corrente elétrica. Geralmente, as águas mais mineralizadas costumam apresentar valores de condutividade elétrica mais elevados (Brás, 2020).

A condutividade elétrica aumenta com a temperatura, assim é conveniente descrever os valores deste parâmetro para uma temperatura de referência de 25 °C, uma vez que este parâmetro aumenta com a temperatura a uma taxa de aproximadamente 2 % para cada grau celsius (°C) (Custodio & Llamas, 1983). Os valores mais elevados de condutividade elétrica na água subterrânea podem estar associados a processos naturais, como a dissolução resultante da interação água-rocha, ou processos de

contaminação, nomeadamente de origem doméstica, agrícola, industrial ou intrusão salina (Correia, 2015).

Na Figura 49 apresentam-se os valores de condutividade elétrica obtidos na água subterrânea para as duas campanhas de campo e na Tabela 7 o resumo dos parâmetros estatísticos.

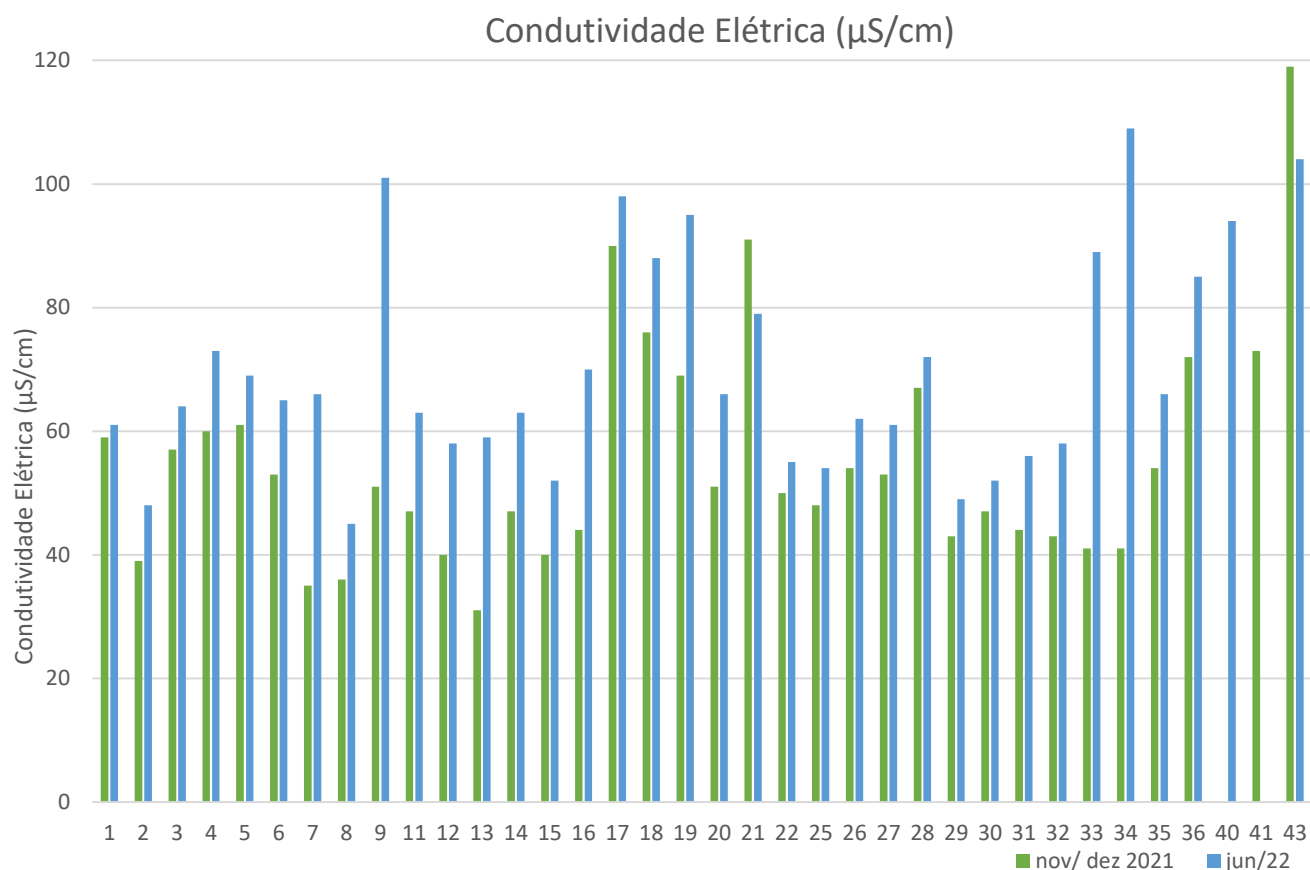


Figura 49- Variação da condutividade elétrica nas minas de água da Montanha da Penha.

Tabela 7 - Dados estatísticos dos valores da condutividade elétrica dos pontos amostrados.

CE (µS/cm)	novembro e dezembro de 2021	junho de 2022
Mínimo	31	45
Máximo	119	109
Média	55,03	69,97
Mediana	51	65
Desvio Padrão	18,02	17,19
Coefficiente de Variação (%)	32,75	24,57
Nº determinações	35	35

A partir da Figura 49 é possível constatar que ocorreu um aumento da condutividade elétrica, na maioria dos pontos de água amostrados, entre novembro e dezembro de 2021 e junho de 2022, com valores de condutividade elétrica médios de 55,03 µS/cm e 69,97 µS/cm, respetivamente (Tabela 7). Este

aumento poderá estar relacionado com o aumento da temperatura atmosférica em junho de 2022, um período de reduzida precipitação, em que a evaporação da água leva ao incremento da concentração dos constituintes da água, contribuindo também para o aumento da condutividade elétrica (Figura 49). A condutividade elétrica permite avaliar o grau de mineralização da água, estando na Tabela 8 sintetizada a classificação da mineralização da água e respetiva indicação quanto à sua qualidade para consumo humano, segundo Mendes & Oliveira (2004).

Tabela 8 - Classificação da mineralização da água (adaptado de Mendes & Oliveira, 2004).

Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Mineralização	Qualidade da água
< 100	Muito fraca	Excelente
100 - 200	Fraca	Excelente
200 - 400	Pouco acentuada	Excelente
400 - 600	Média	Boa
600 - 1000	Importante	Utilizável
1000 - 1500	Excessiva	Difícilmente utilizável
> 1500	Excessiva	Não utilizável na rega

Como a condutividade elétrica varia entre 31 e 119 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabela 7), a água subterrânea que circula neste sistema de minas de água é classificada como “muito fracamente a fracamente mineralizada”, sendo de excelente qualidade para consumo humano. Como a água apresenta uma baixa mineralização, o fluxo subterrâneo da água neste sistema hídrico é considerado como pouco profundo (Mendes *et al.*, 2008).

6.2.4. Total de Sólidos Dissolvidos (TDS)

Para melhor avaliar a mineralização total da água, existem dois parâmetros fundamentais, o resíduo seco (RS) e o Total de Sólidos Dissolvidos (TDS) (Puga, 2016), tendo sido apenas determinado o Total de Sólidos Dissolvidos na água subterrânea da Montanha da Penha.

O Total de Sólidos Dissolvidos é a quantidade de todas as substâncias dissolvidas na água, quer sejam voláteis ou não (Custodio & Llamas, 1983). Este parâmetro aumenta na água subterrânea à medida que a água se move ao longo da sua rede de fluxo, fazendo com que a qualidade da água se altere ao longo da linha de fluxo pois a concentração de solutos aumenta com o tempo de residência em meio subterrâneo (Freeze & Cherry, 1979; Hudak, 2001).

Na Figura 50 apresenta-se o valor do Total de Sólidos Dissolvidos obtido na água das duas campanhas de campo e na Tabela 9 o resumo dos parâmetros estatísticos.

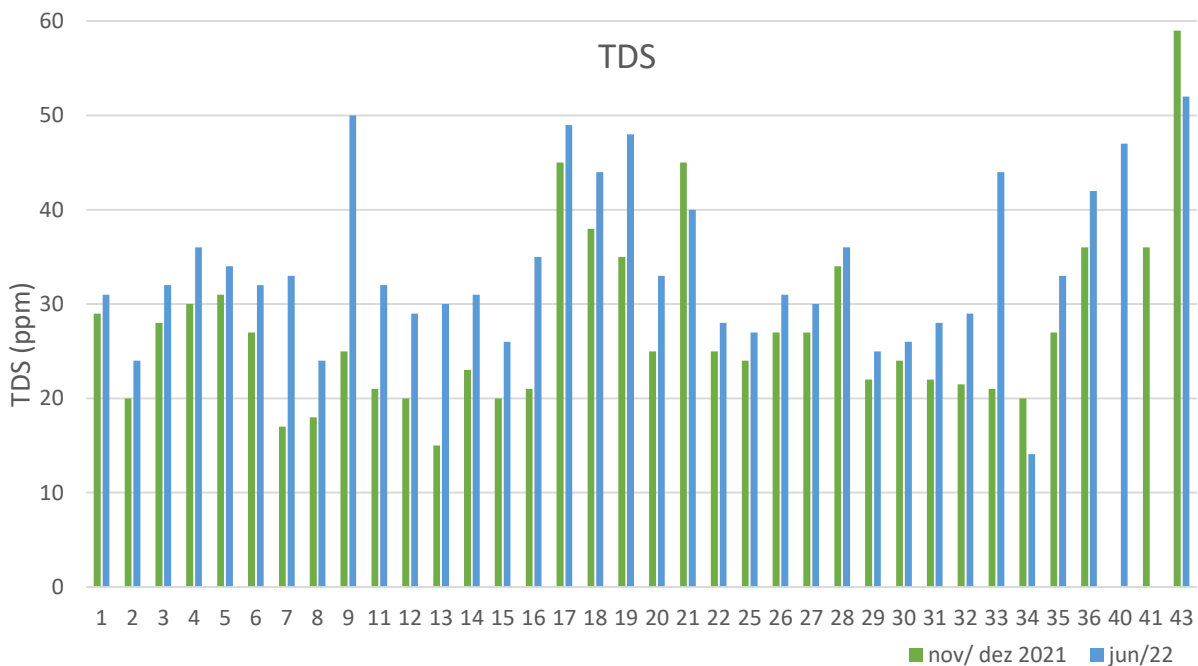


Figura 50- Variação do Total de Sólidos Dissolvidos nas minas de água da Montanha da Penha.

Tabela 9 - Dados estatísticos dos valores do Total de Sólidos Dissolvidos nos pontos de água amostrados.

TDS (ppm)	novembro e dezembro de 2021	junho de 2022
Mínimo	15	14.1
Máximo	59	52
Média	27.39	33.86
Mediana	25	32
Desvio Padrão	9.02	8.50
Coefficiente de Variação (%)	32.94	25.10
Número de medidas	35	35

Na maioria dos pontos de água analisados, registra-se um ligeiro aumento do valor de Total de Sólidos Dissolvidos entre a campanha de novembro e dezembro de 2021 e a de junho de 2022, registrando valores médios de 27,39 ppm e 33,86 ppm, respectivamente (Figura 50; Tabela 9). Este pequeno aumento poderá dever-se ao aumento da temperatura que ocorreu durante o mês de junho de 2022, ou seja, temperaturas mais elevadas promovem um aumento da quantidade de substâncias dissolvidas na água (Carvalho, 2004).

O reduzido valor de Total de Sólidos Dissolvidos que estas águas apresentam (Figura 50; Tabela 9) poderá refletir uma recarga local associada a um regime de fluxo pouco profundo (Carreira *et al.*, 2010). Em águas naturais, as variações de composição levam a que não se registre uma relação direta entre a condutividade elétrica e o valor de sólidos totais dissolvidos. Porém, na água com composição química semelhante, quanto à distribuição de cátions e aniões, esta correlação é muito boa, como acontece em

águas do mesmo sistema aquífero (Custódio & Llamas, 1983). Na água subterrânea existe uma boa correlação entre o valor da condutividade elétrica e o Total de Sólidos Dissolvidos (Figura 51).

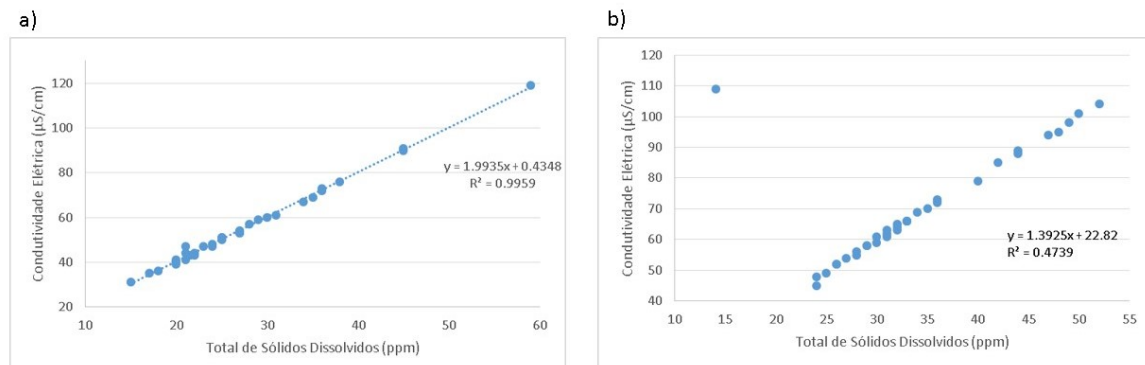


Figura 51- Variação entre a condutividade elétrica e o teor de Total de Sólidos Dissolvidos na água subterrânea da Montanha da Penha: a - novembro e dezembro de 2021; b - junho de 2022.

A partir da Figura 51 é bem visível a correlação positiva, evidenciada na maioria dos pontos de água amostrados na amostragem que decorreu em novembro e dezembro de 2021, entre a condutividade elétrica e o total de sólidos dissolvidos ($r = 0,99$), enquanto na campanha de campo que decorreu em junho de 2022 essa correlação não é visível ($r = 0,47$).

Davis e De Wiest (1966) e Freeze e Cherry (1979) categorizaram a água com base na concentração de TDS em quatro grupos (Tabela 10). Deste modo, e como os valores deste parâmetro variam entre 14.10 ppm e 59 ppm (Tabela 9), todas as amostras analisadas enquadram-se na primeira categoria, TDS < 500 mg/L, classificadas como “*desejáveis para beber*”. Todos os pontos de água analisados se enquadram na primeira categoria, com TDS < 1 000 mg/L, ou seja, esta água é classificada como “*fresca e própria para consumo*”. Assim, considerando estas duas classificações pode concluir-se que a água que circula no sistema de minas de água da Penha é apropriada para consumo humano.

Tabela 10 - Classificação da água subterrânea (Adaptado de Davis e De Wiest (1966) e Freeze e Cherry (1979)).

TDS (mg/L)	Tipo de água
Classificação segundo Davis e De Wiest (1966)	
< 500	Desejável para beber
500 - 1 000	Admissível para beber
< 3 000	Útil para irrigação
> 3 000	Impróprio para beber e para irrigação
Classificação segundo Freeze e Cherry (1979)	
< 1 000	Fresca
1 000 - 10 000	Salobra
10 000 - 100 000	Salina
> 100 000	Salmoura

6.2.5. Potencial oxidação- redução (ORP/Eh)

Diversas reações que envolvem transferências entre constituintes gasosos, sólidos ou dissolvidos ocorrem na água subterrânea. Esta transferência de elétrons provoca mudanças nos estados de oxidação dos reagentes e dos produtos das reações (Freeze e Cherry, 1979). Estas reações são conhecidas como reações de oxidação-redução ou reações redox. As reações redox são processos químicos em que os elétrons são movidos de um átomo para outro, e o equilíbrio termodinâmico pode ser usado para antecipar como essa transferência ocorreu (Fernandes, 2015).

O potencial redox representa a capacidade de um composto doar (oxidação) ou aceitar (redução) elétrons, ou seja, de transferir elétrons numa solução. Este parâmetro permite avaliar a estabilidade de um ião num determinado estado de oxidação (Custodio e Llamas, 1983; Appelo & Postma, 2010).

Na Figura 52 apresentam-se os valores do potencial oxidação-redução da água obtidos na campanha de campo que decorreu entre novembro e dezembro de 2021 e na Tabela 11 o resumo dos parâmetros estatísticos.

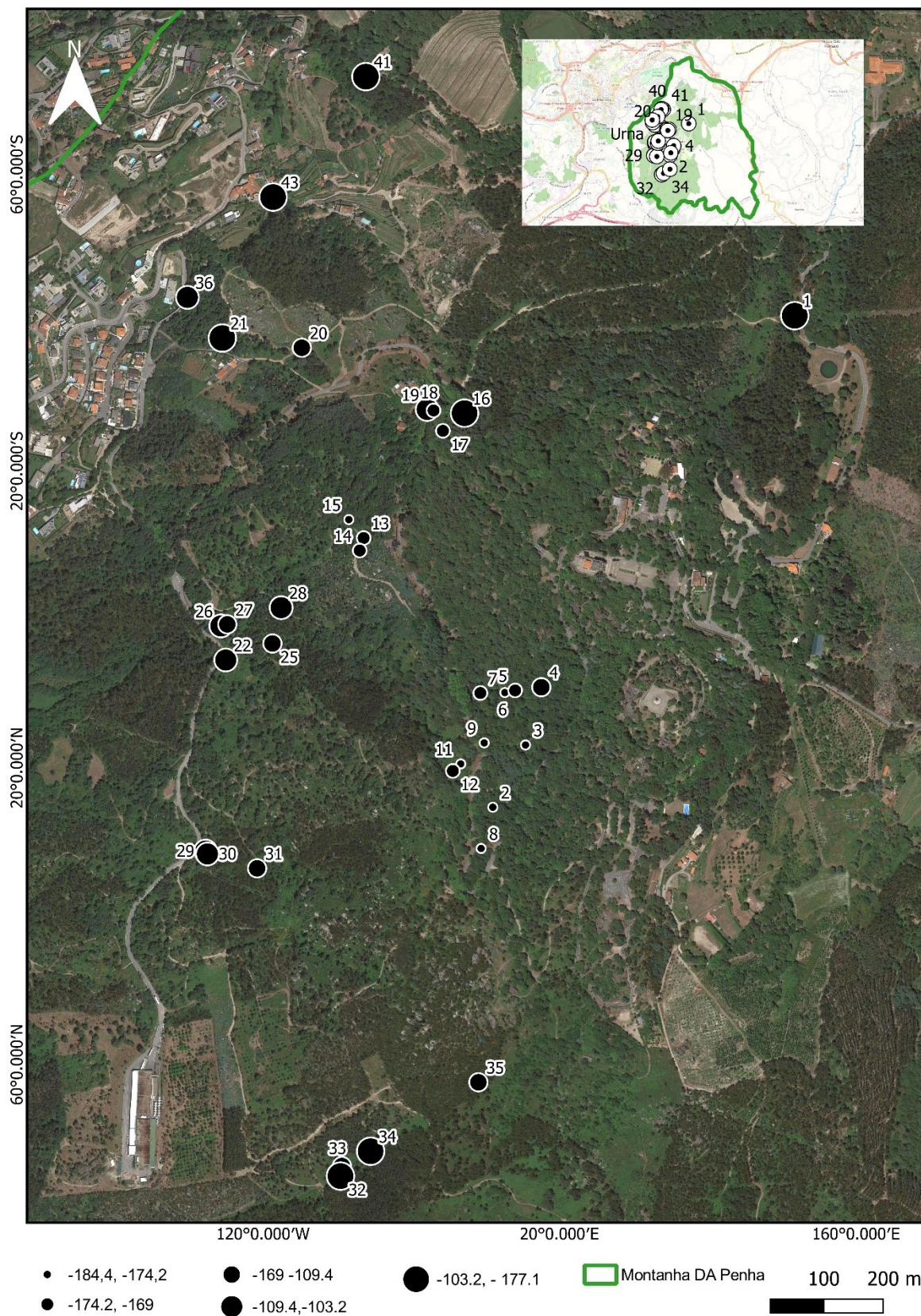


Figura 52- Variação do potencial de oxidação-redução nos pontos de água subterrânea da Montanha da Penha.

Tabela 11 - Dados estatísticos obtidos para os valores de potencial oxidação-redução da água subterrânea.

ORP (mV)	novembro e dezembro de 2021
Mínimo	-184,4
Média	-135,9
Mediana	-113,8
Máximo	-37,9
Desvio Padrão	39,12
Coefficiente de Variação (%)	-28,79
Nº de determinações	35

Os valores do potencial oxidação-redução, com um mínimo de aproximadamente -184,4 mV e máximo de -37,9 mV, encontram-se dentro do intervalo expectável para as águas subterrâneas, variando entre 700 e -480 mV definido por Custodio & Llamas (1983) (Figura 52; Tabela 11). Também, a partir da Figura 52 é notório que os valores de maior potencial oxidação- redução se localizam a baixas altitudes, enquanto os teores mais baixos deste parâmetro físico- químico se localizam mais próximo do topo da Montanha da Penha. Como a medição deste parâmetro se realizou entre novembro e dezembro de 2021, sendo a medição “*in situ*” dos primeiros 20 pontos realizada no final de novembro, enquanto os restantes pontos fora medidos no início de dezembro, ocorrendo alguma precipitação entre as duas campanhas. Este facto poderá justificar a variação observada.

A partir da Figura 53 denota-se que todos os valores de potencial oxidação-redução são negativos, indicando que esta água circula num ambiente redutor.

6.2.6. Alcalinidade

A capacidade da água em receber prótons, ou a capacidade de neutralizar ácidos, é conhecida como alcalinidade. A influência de bases presentes na água, como iões bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{2-}), além de OH^- , H_3SiO_4^- , PO_4^{3-} , H_2BO_3^- e F^- , entre outros, é medida através da alcalinidade (Custodio & Llamas, 1983). Os restantes aniões, com exceção do HCO_3^- , estão frequentemente presentes na água em baixas concentrações. A maior parte da alcalinidade da água subterrânea está relacionada com a concentração de HCO_3^- (Lima, 2010).

Todas as amostras de água analisadas registam um valor de pH inferior a 8,3, como tal, não existem quantidades importantes de ião carbonato (Custodio & Llamas, 1983).

Na Figura 53 apresentam-se as quantidades de alcalinidade obtidas em cada ponto de água subterrânea e na Tabela 12 o resumo dos parâmetros estatísticos obtidos na campanha de junho de 2022.

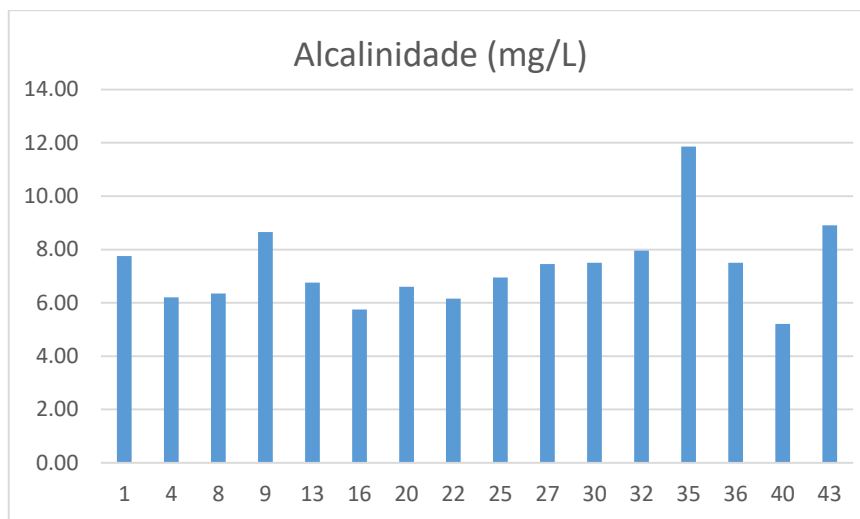


Figura 53- Variação da alcalinidade (mg/L) nos pontos de água amostrados.

Tabela 12 - Dados estatísticos dos valores da alcalinidade (mg/L) dos pontos amostrados.

Mínimo	5,20
Máximo	11,86
Média	7,35
Desvio Padrão	1,52
Coefficiente de variação	20,69
Mediana	7,21
Nº de determinações	16

A partir da Figura 53 verifica-se que a alcalinidade da água subterrânea varia entre 5,20 mg/L e 11,86 mg/L, sendo o valor médio de 7,35 mg/L (Tabela 12). Como todos os pontos apresentam valores inferiores a 50 mg/L (valor de referência), poderão indicar que a alcalinidade desta água é muito próxima da água da chuva, sugerindo um reduzido tempo de residência (Adams *et al.*, 2001; Condesso de Melo, 2002).

6.2.7. Componente maioritária

A composição das águas naturais varia de acordo com uma série de variáveis, mas normalmente segue um padrão particular, tendo em consideração a abundância relativa dos vários constituintes (Lima, 2010). Sódio, cálcio, magnésio, cloreto, sulfato e sílica são agrupados no grupo dos componentes maioritários. Apesar de tipicamente com concentração baixa, o nitrato (NO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}) e potássio (K^+) são frequentemente considerados como parte da componente maioritária (Custodio e Llamas, 1983). Como iões menores podem ocorrer o NO_3^- , CO_3^{2-} , K^+ , estrôncio (Sr^{2+}), ferro (Fe^{2+}), nitrito (NO_2^-), flúor (F) e a amónia (NH_4^+) (Custodio e Llamas, 1983).

Da mesma forma, alumínio, arsênio, bário, brometo, cádmio, crômio, cobalto, cobre, iodo, chumbo, lítio, manganês, molibdênio, fosfato, selênio, urânio, e zinco são considerados elementos vestigiais ou traço (Hounslow, 1995).

A divisão dos constituintes em maior, menor e traço não tem um significado rígido, uma vez que há inúmeras exceções às concentrações definidas, e também há sobreposições entre os limites das diversas classes (Lima, 2010).

A componente maioritária e vestigiária das águas subterrâneas é apresentada na tabela do Anexo 5.

6.2.7.1. Aniões

Cloreto (Cl)

Segundo Mendes & Oliveira (2004), o cloreto representa um dos sais mais abundantes na natureza. A concentração deste anião é variável com a natureza geológica dos materiais atravessados, as condições climáticas e a potencial contaminação por efluentes industriais. O cloreto é muito solúvel e estável em solução, sendo dificilmente precipitável. Aparece frequentemente associado ao catião Na^+ , não tendo, contudo, uma concentração semelhante (Custódio & Llamas, 1996). Está presente em todas as águas naturais, geralmente em concentrações baixas, podendo variar entre 1 e 19 000 mg/L. A origem natural está associada à dissolução de formações evaporíticas, à interação água-rocha em ambientes sedimentares e à água do mar (Hem, 1985). A precipitação atmosférica é a outra fonte de cloreto na água, uma vez que este anião faz parte da sua composição química, levando a que seja integrado no ciclo hidrológico, acabando por alcançar a água subterrânea.

O ião Cl^- está presente em vários tipos de minerais constituintes das rochas. Nas rochas ígneas, aparece como constituinte de diversos minerais, como a sodalite e a apatite. Dado que é um ião conservativo (Stober & Bucher, 1999) não participa nas reações químicas.

Na Figura 54 é apresentada a quantidade de cloreto na água subterrânea da Montanha da Penha e na Tabela 13 o resumo dos parâmetros estatísticos referente à campanha de junho de 2022.

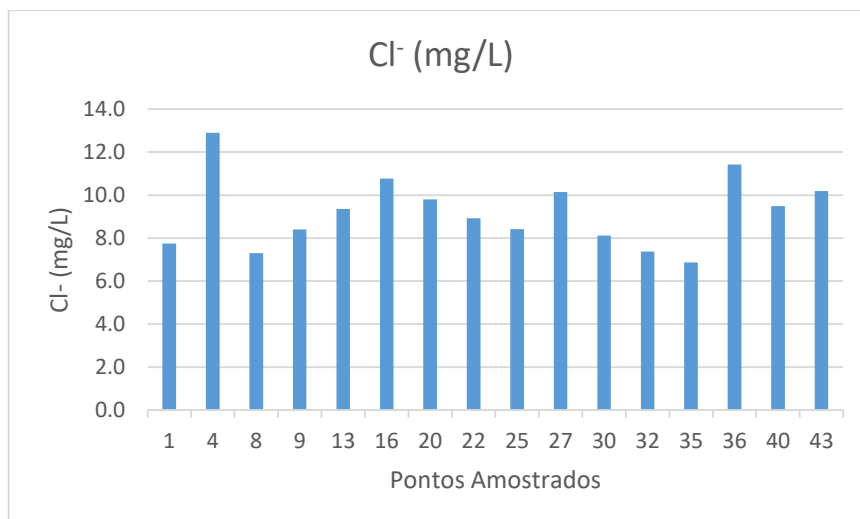


Figura 54- Variação da quantidade de cloreto (mg/L) presente na água dos pontos amostrados.

Tabela 13 - Dados estatísticos dos valores de cloreto (mg/L) dos pontos amostrados.

Mínimo	6,9
Máximo	12,9
Média	9,2
Mediana	9,14
Desvio padrão	1,59
Coefficiente de variação	17,29
Número de determinações	16

Através da Figura 54 e da Tabela 13 observa-se que o teor de cloreto na água varia entre 6,9 mg/L e 12,9 mg/L, com um valor médio de 9,2 mg/L (Tabela 13). A água subterrânea apresenta, geralmente, teores de cloreto inferior a 100 mg/L (Feitosa *et al.*, 2008), o que se verifica neste sistema de minas de água subterrânea. Também, o teor de cloreto é um indicador da baixa salinidade (Saha *et al.*, 2019), como verificado nestas águas subterrâneas.

Sulfato (SO₄²⁻)

O anião sulfato é moderadamente a muito solúvel e dificilmente precipita. A sua concentração em águas naturais varia, normalmente, entre 2 e 150 mg/L (Hem, 1985; Custódio & Llamas, 1996).

A sua origem na água deve-se à interação água-rocha em ambientes geológicos com minerais ricos em sulfuretos. Este ião está presente tanto em rochas ígneas como em rochas sedimentares contendo sulfuretos metálicos. Minerais como a pirite constituem fontes naturais de sulfato e ferro na água subterrânea. O sulfato ocorre, também, em certos feldspatóides (Hem, 1985).

A dissolução de minerais sulfatados (gesso, anidrite) contribui fortemente para a presença de sulfato na água, podendo também resultar da oxidação de sulfuretos, da concentração no solo, da água da chuva e de atividades urbanas, industriais e agrícolas (Custodio & Llamas, 1983).

Na Figura 55 apresenta-se o teor de sulfato na água subterrânea e na Tabela 14 o resumo dos parâmetros estatísticos para a campanha de junho de 2022.

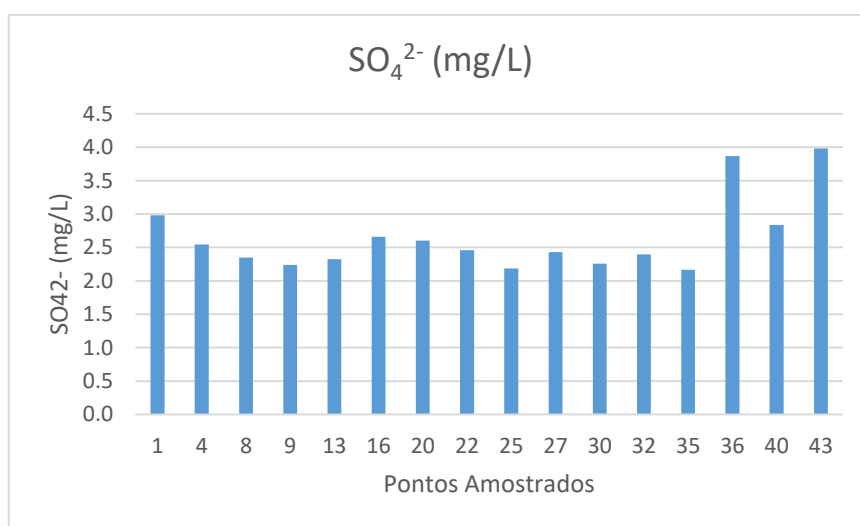


Figura 55- Variação da quantidade de sulfato (mg/L) presente na água subterrânea os pontos amostrados.

Tabela 14 - Dados estatísticos dos valores de sulfato (mg/L) dos pontos amostrados.

Mínimo	2,2
Máximo	4,0
Média	2,6
Mediana	2,44
Desvio padrão	0,53
Coefficiente de variação	20,16
Número de determinações	16

A concentração de sulfato nas amostras de água subterrânea varia entre 2,2 e 4,0 (Figura 55), sendo o valor médio 2,6 mg/L (Tabela 14). A partir da Figura 55, percebe-se que a maioria dos pontos apresenta concentrações iguais ou inferiores a 3,0 mg/L, exceto os pontos 36 e 43, que apresentam concentração de 3,9 mg/L e 4,0 mg/L, respectivamente, podendo considerar-se estes pontos atípicos em relação aos restantes pontos amostrados. A reduzida concentração de sulfato na água subterrânea indica que a área em estudo não apresenta relevantes focos de contaminação industrial, dado que os elevados teores de sulfato provêm de fontes antrópicas e processo industriais (Mostafa *et al.*, 2017).

Nitrato (NO_3^-)

O nitrato (NO_3^-) constitui a forma mais usual de acumulação de azoto na água subterrânea, o que explica a ocorrência de concentrações mais elevadas em regiões agrícolas (Hem,1985).

As concentrações normais de NO_3^- na água variam entre 0.10 e 10 mg/L (Custodio & Llamas, 1983), no entanto pode ser indicado um intervalo mais alargado até 30 mg/L (Pulido Carrillo, 1978), sendo referido que teores superiores a 60 mg/L provêm provavelmente de contaminação orgânica, uma vez que algumas fontes deste elemento são a decomposição de matéria orgânica, os processos de nitrificação natural, a contaminação industrial, agrícola, urbana e o uso de fertilizantes agrícolas (Custodio & Llamas, 1983).

Na Figura 56 apresenta-se a quantidade de nitrato obtida em cada ponto de água e a Tabela 15 o resumo dos parâmetros estatísticos, referentes à campanha de junho de 2022.

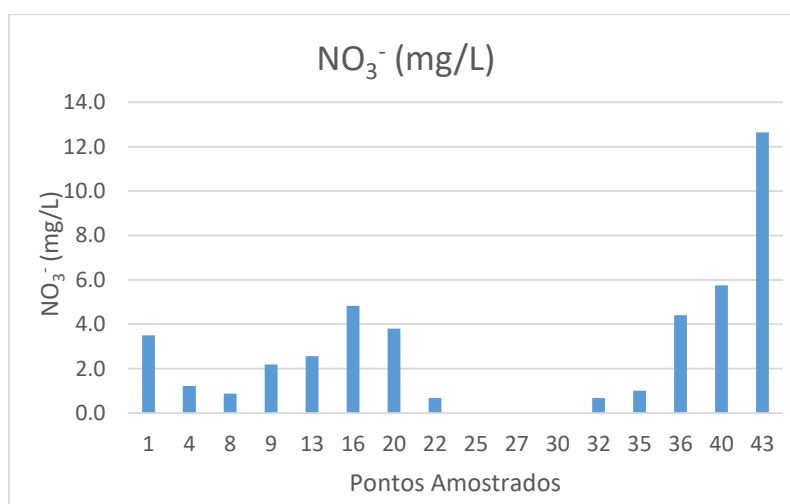


Figura 56- Variação da quantidade de nitrato (mg/L) na água.

Tabela 15 - Dados estatísticos dos valores de nitrato (mg/L) dos pontos amostrados.

Mínimo	0,68
Máximo	12,65
Média	3,39
Mediana	2,56
Desvio padrão	3,139
Coefficiente de variação (%)	92,47
Número de determinações	16

A partir da Figura 56 é possível observar que a concentração de nitrato na água subterrânea varia entre os 0,68 mg/L e 12,65 mg/L, correspondendo o valor máximo à água da mina 43, que se localiza no interior de uma habitação particular. Este valor, muito superior em relação aos restantes, poderá indicar

uma contaminação da água por ação antrópica. No entanto, segundo a classificação de Pulido Carrillo (1978) todos os pontos de água apresentam valores não contaminantes. De referir que poderá ser considerado um valor atípico, uma vez que os restantes valores variam entre 0,68 mg/L e 5,8 mg/L, enquadrando-se este intervalo nas concentrações normais de nitrato indicada por Custodio & Lllamas (1983). No ponto de água 25 não foi detetada a presença de nitratos embora ocorra numa área agrícola. Este facto poderá indicar que a agricultura praticada neste local é biológica ou o uso de fertilizantes é reduzido.

Fluoreto (F)

O fluoreto é um elemento químico encontrado com frequência em águas subterrâneas. A ocorrência de fluoreto nesta água deve-se ao intemperismo e lixiviação de minerais que contêm flúor (e.g. apatite, fluorite, biotite, moscovite e horneblenda), em rochas e sedimentos. O flúor quando ingerido em pequenas quantidades ($F^- < 0,5$ mg/L) é benéfico para a saúde dentária, endurecendo o esmalte e reduzindo a incidência de cáries (Fung *et al.*, 1999; Shomar *et al.*, 2004), enquanto concentrações acima de 1,5 mg/L podem causar uma doença, a fluorose dentária (Handa, 1975; OMS, 1984; USPHS, 1987; Ripa, 1993).

Na Figura 57 apresenta-se a quantidade de F⁻ na água e na Tabela 16 o resumo dos parâmetros estatísticos referente à campanha de junho de 2022.

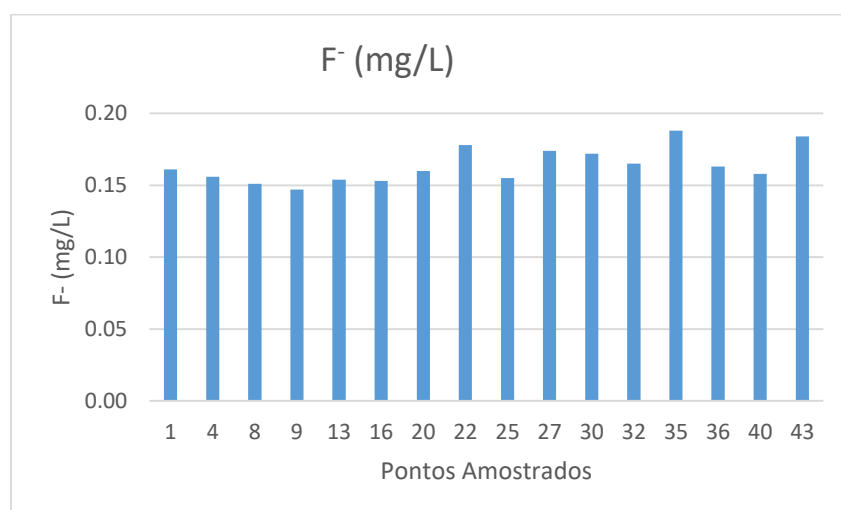


Figura 57- Variação da quantidade de fluoreto (mg/L) presente nos pontos amostrados.

Tabela 16 - Dados estatísticos dos valores de fluoreto (mg/L) dos pontos amostrados.

Mínimo	0,15
Máximo	0,19
Média	0,16
Mediana	0,16
Desvio padrão	0,012
Coefficiente de variação	7,20
Número de determinações	16

A partir da Figura 57 é perceptível que a concentração de fluoreto na água subterrânea é inferior a 0,20 mg/L, variando entre 0,15 mg/L e 0,19 mg/L, com uma média de 0,16 mg/L (Tabela 16). Normalmente, o fluoreto ocorre em concentrações que variam entre 0,1 e 1,5 mg/L (Feitosa *et al.*, 2008). Estas reduzidas quantidades poderão derivar de minerais como a anfíbola, biotite, fluorite e apatite presentes nas rochas graníticas (Edmunds e Smedley, 2005).

6.2.7.2. Catiões

Sódio (Na⁺)

A origem do sódio na água dos aquíferos fraturados provém da hidrólise de feldspatos dos granitos e da mistura com água proveniente de aquíferos porosos. É um catião extremamente solúvel e responsável pela salinidade. Na água subterrânea apresenta, normalmente, concentrações entre 0,1 e 100 mg/L (Feitosa & Filho, 2000), sendo maioritariamente superior a 5 mg/L (Clesceri *et al.*, 1998).

Na Figura 58 apresentam-se as quantidades obtidas para cada ponto amostrado e na Tabela 17 o resumo dos parâmetros estatísticos referente à campanha de junho de 2022.

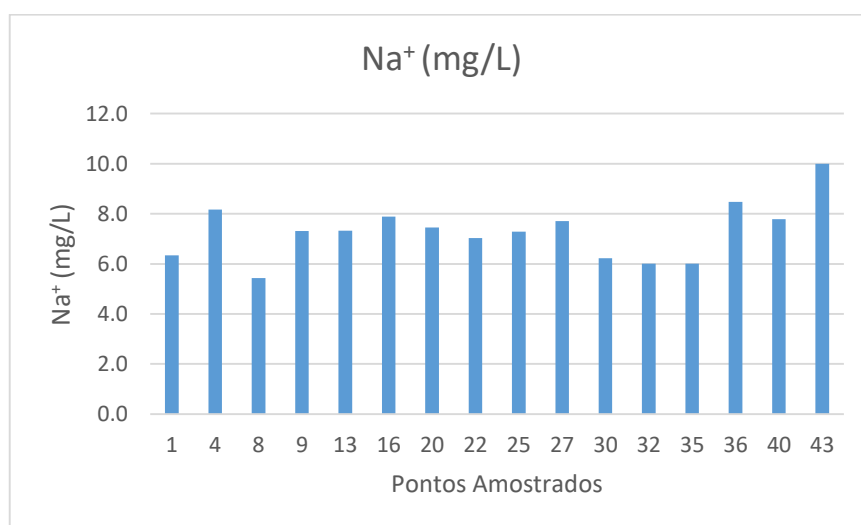


Figura 58- Variação da quantidade de sódio (mg/L) nos pontos de água amostrados.

Tabela 17 - Dados estatísticos dos valores de sódio (mg/L) dos pontos amostrados.

Mínimo	5,4
Máximo	10,0
Média	7,3
Mediana	7,3
Desvio padrão	1,09
Coefficiente de variação	15,04
Número de determinações	16

A partir da Figura 58 é possível observar que a concentração de sódio na água subterrânea é relativamente constante entre os pontos analisados, variando entre os 5,4 mg/L e 10,0 mg/L, com um valor médio de 7,3 mg/L (Tabela 17). Este intervalo enquadra-se nas concentrações normais de sódio proposto por Feitosa & Filho (2000).

A concentração de sódio é particularmente importante na classificação da água utilizada para fins de irrigação, uma vez que o sódio, quando em quantidades excessivas, reage com o solo e reduz a sua permeabilidade. A percentagem de sódio em todas as águas naturais é um parâmetro usado para avaliar a sua adequação para fins agrícolas (Wilcox, 1948).

O teor de sódio é geralmente expresso em termos de percentagem de sódio (% Na) e o ião sódio (Na⁺) ocorre como um catião principal nas amostras de água obtidas pela seguinte equação:

$$\text{Na}^+(\%) = (\text{Na}^+ + \text{K}^+) \times 100 / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+).$$

Os valores calculados da percentagem de sódio variam de 67,7 a 82,77 mg/L (Figura 59) com uma média de 75,8 mg/L.

A qualidade da água subterrânea pode ser avaliada utilizando o diagrama de Wilcox, que relaciona a % de sódio e a condutividade elétrica (Figura 59). A projeção neste diagrama mostra que todas as amostras de água subterrânea são classificadas como “*excelentes a boas*” para a irrigação de culturas, ou seja, nestas águas não existe excesso de sódio nem os efeitos osmóticos no sistema solo-planta (Ali & Ali, 2018).

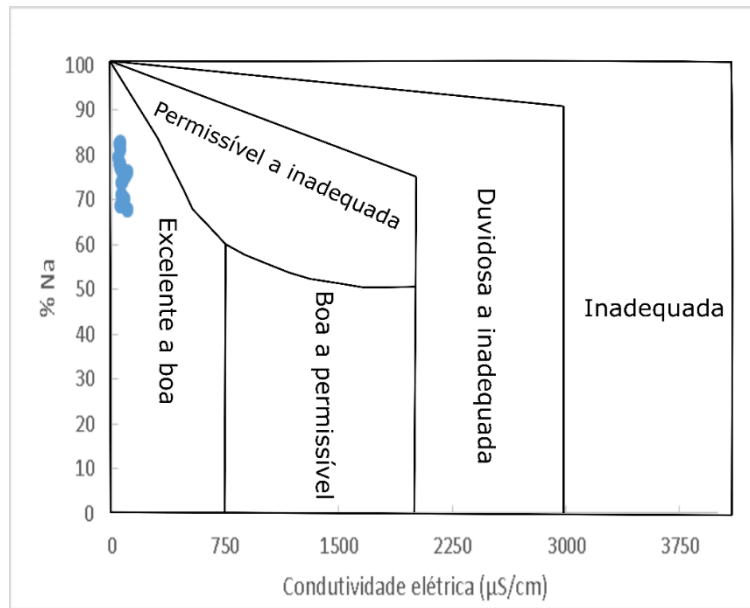


Figura 59- Projeção da água subterrânea no diagrama de Wilcox.

Cálcio (Ca^{2+})

O cálcio é um elemento muito solúvel, precipitando facilmente sob a forma de CaCO_3 (Custódio & Llamas, 1996). Este catião confere dureza às águas, ocorrendo sob a forma de bicarbonato e, menos frequentemente, como carbonato. De acordo com Matthes (1982), os íons de cálcio são removidos da água subterrânea através de trocas iônicas com sódio ou outros íons, ocorrendo o processo recíproco de substituição de Ca por Na geralmente no limite entre água doce e água salgada cloretada sódica.

A concentração de cálcio na água subterrânea normalmente varia de 10 a 100 mg/L (Feitosa & Filho, 2000). É um elemento essencial nos minerais que constituem as rochas ígneas, sobretudo na plagioclase, piroxenas e anfíbolos (Krauskopf & Bird, 1995).

A gênese natural está associada à hidrólise de minerais silicatados e à dissolução de minerais carbonatados. O cálcio é um constituinte fundamental de diversos minerais, estando presente, principalmente, nas piroxenas, anfíbolos, e feldspatos, como as plagioclases cálcicas. A qualquer temperatura, o cálcio é um elemento móvel nos processos de interação água-rocha (Albarède, 2003).

Na Figura 60 apresenta-se o teor de cálcio na água e na Tabela 18 o resumo dos parâmetros estatísticos referente à campanha de junho de 2022.

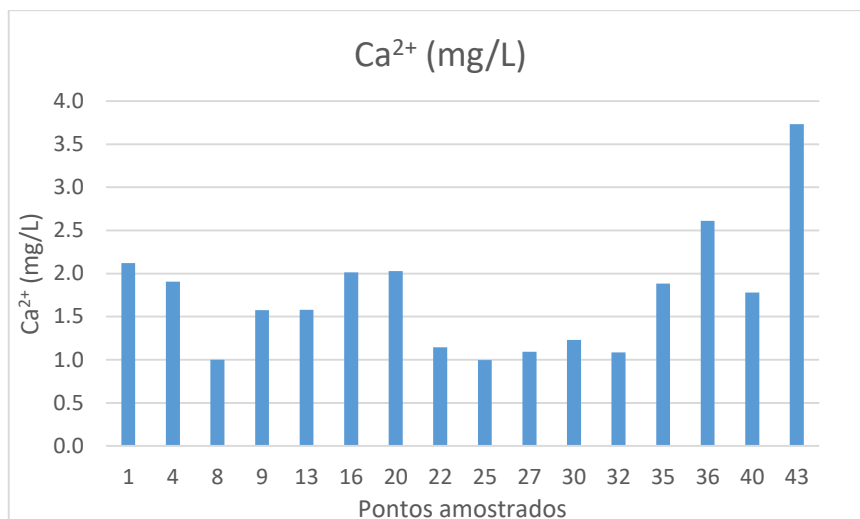


Figura 60- Variação da quantidade de cálcio (mg/L) nos pontos de água amostrados.

Tabela 18 - Dados estatísticos dos valores de cálcio (mg/L) na água dos pontos amostrados.

Mínimo	1,0
Máximo	3,7
Média	1,7
Mediana	1,7
Desvio padrão	0,69
Coefficiente de variação	39,95
Número de determinações	16

A maioria dos pontos de água apresenta concentrações de cálcio inferiores a 3,0 mg/L, exceto o ponto de água 43, que apresenta um teor superior de 3,7 mg/L (Figura 60). A concentração de cálcio na água subterrânea varia entre 1,0 e 3,7 mg/L (Tabela 18), apresentando todos os pontos de água valores inferiores aos normais propostos por Feitosa & Filho (2000). A presença de algum Ca pode ser explicada pelas reações de troca iônica que ocorrem entre os minerais argilosos (como a caulinite) e a água subterrânea (Na e K são absorvidos pelas argilas, enquanto o Ca é libertado; Afonso *et al.*, 2010), sendo as rochas graníticas dominantes na área em estudo.

Potássio (K⁺)

O potássio é encontrado em pequenas quantidades na água subterrânea e esta tipicamente associado a minerais de aluminossilicatos (como micas e argilas). Os teores deste elemento resultam da decomposição das plantas, degradação mineral e escoamento agrícola (Clesceri *et al.*, 1998). Pode, ainda, ser encontrado na água subterrânea associado à aplicação de fertilizantes e decomposição de

produtos animais ou residuais (Saha *et al.*, 2019). A concentração de potássio na água subterrânea é inferior a 10 mg/L e geralmente varia entre 1 e 5 mg/L (Feitosa & Filho, 2000).

Silvite, carnalite e feldspato potássico são exemplos de minerais típicos ricos em potássio (Reimann e Caritat, 1998), sendo os últimos comuns em rochas graníticas e, juntamente com as micas, representam quase todo o K^+ presente nas rochas (Lima, 2010).

O potássio tem elevada solubilidade e uma fraca tendência para precipitar, semelhante ao sódio (Custódio & Lamas, 1996). O K^+ é libertado pelos minerais com dificuldade e tem um potencial significativo de ser reincorporado pelos subprodutos do intemperismo das rochas, especialmente minerais argilosos específicos, ao contrário do Na^+ , que tende a permanecer em solução, após libertado a partir dos minerais silicatados (Albaréde, 2003).

Na Figura 61 apresenta-se a quantidade obtida na água e na Tabela 19 o resumo dos parâmetros estatísticos referente à campanha de junho de 2022.

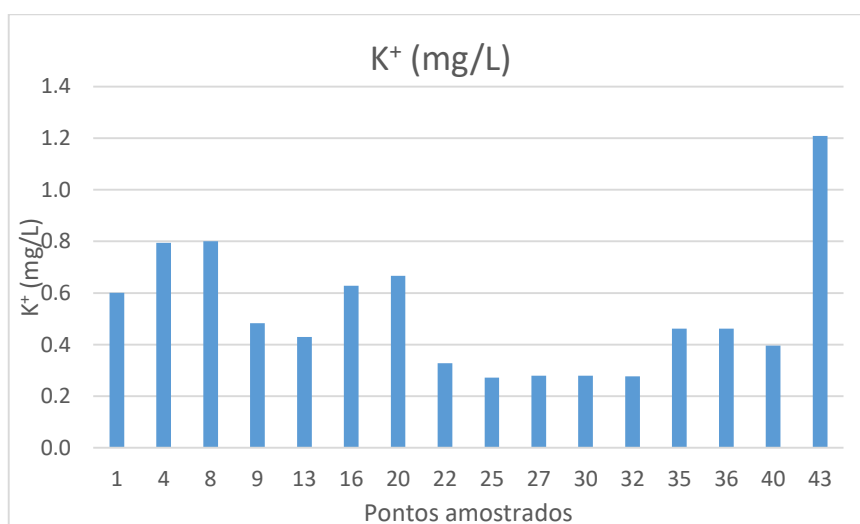


Figura 61- Variação da quantidade de potássio (mg/L) nos pontos de água amostrados.

Tabela 19 - Dados estatísticos dos valores de potássio (mg/L) dos pontos amostrados.

Mínimo	0,3
Máximo	1,2
Média	0,5
Mediana	0,5
Desvio padrão	0,25
Coefficiente de variação	47,12
Número de determinações	16

A concentração de potássio na água subterrânea analisada é inferior a 1,5 mg/L, variando entre 0,3 mg/L e 1,2 mg/L (Figura 61), e com um valor médio de 0,5 mg/L (Tabela 19). A maioria dos pontos de água registam teores de potássio inferiores a 0,8 mg/L, sendo o valor máximo observado na água da mina 43, o qual pode ser considerado como atípico.

Magnésio (Mg^{2+})

As propriedades hidrogeoquímicas do magnésio são semelhantes às do cálcio, sendo este catião mais solúvel e demora mais tempo a precipitar (Custódio & Llamas, 1996). Provém da dissolução de minerais de carbonato e da modificação de minerais silicatados, especificamente minerais ferromagnesianos. O magnésio é encontrado em rochas ígneas, em minerais como olivina, piroxena, anfíbola e biotite. Minerais como a clorite e a serpentina são exemplos da sua ocorrência em rochas alteradas (Carvalho, 2013).

A concentração de magnésio na água subterrânea está tipicamente entre 1 e 40 mg/L; em que níveis acima de 100 mg/L revelam a influência do mar (Pulido Carrillo, 1978).

Na Figura 62 apresenta-se a quantidade obtida em cada ponto de água e na Tabela 20 o resumo dos parâmetros estatísticos referente à campanha de junho de 2022.

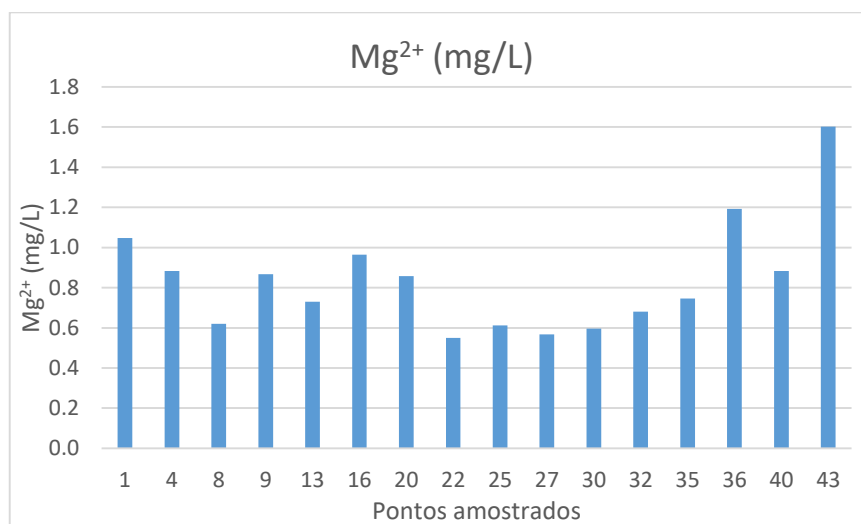


Figura 62- Variação da quantidade de magnésio (mg/L) nos pontos de água amostrados.

Tabela 20 - Dados estatísticos das quantidades de magnésio (mg/L) dos pontos de água amostrados.

Mínimo	0,6
Máximo	1,6
Média	0,8
Mediana	0,8
Desvio padrão	0,27
Coefficiente de variação	31,77
Número de determinações	16

O teor de magnésio na água subterrânea é inferior a 2,0 mg/L (Figura 62), variando entre 0,6 mg/L e 1,6 mg/L (Tabela 20), e enquadrando-se no intervalo de valores proposto por Pulido Carrillo (1978).

É notória a correlação positiva entre a concentração de cálcio e a de magnésio na água subterrânea (Figura 63; $r \approx 0,94$), a qual poderá estar associada à dissolução de minerais, como anfíbola, piroxena e biotite (Carvalho, 2013), este último presente na área em estudo.

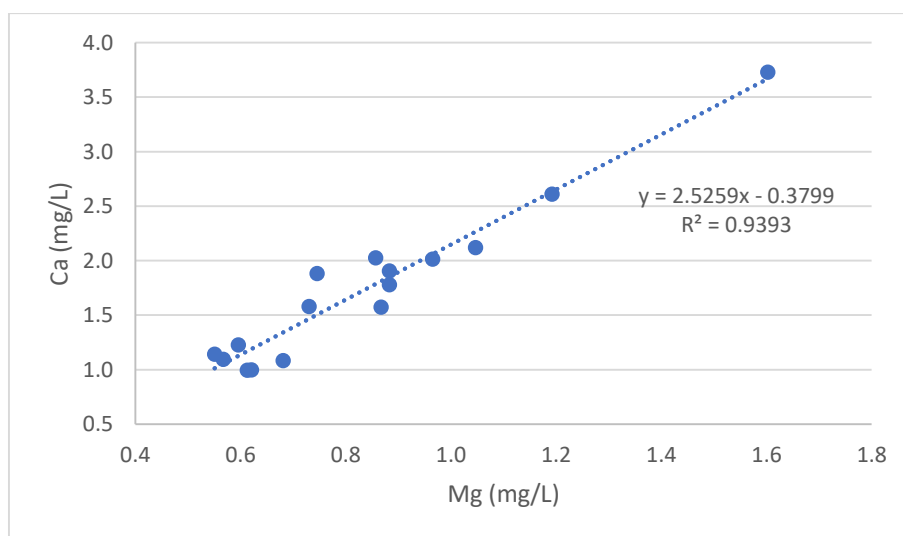


Figura 63- Diagrama de dispersão da concentração de magnésio em função da concentração de cálcio

Sílica

Depois do oxigênio, o silício é o elemento mais abundante na crosta terrestre (Langmuir, 1997). Na sua forma iônica, contribui para a alcalinidade da água; contudo, a ação do CO_2 impede que o pH da água aumente, limitando a solubilidade da sílica. A concentração da sílica em águas naturais varia tipicamente entre 1 e 30 a 40 mg/L; no entanto, a água com bicarbonato de sódio pode conter até 100 mg/L, e a água com um valor de pH alto podem incluir até 1000 mg/L (Hem, 1985; Custódio & Llamas, 1996).

Na Figura 64 apresenta-se a quantidade obtida em cada ponto amostrado e na Tabela 21 o resumo dos parâmetros estatísticos referente à campanha de junho de 2022.

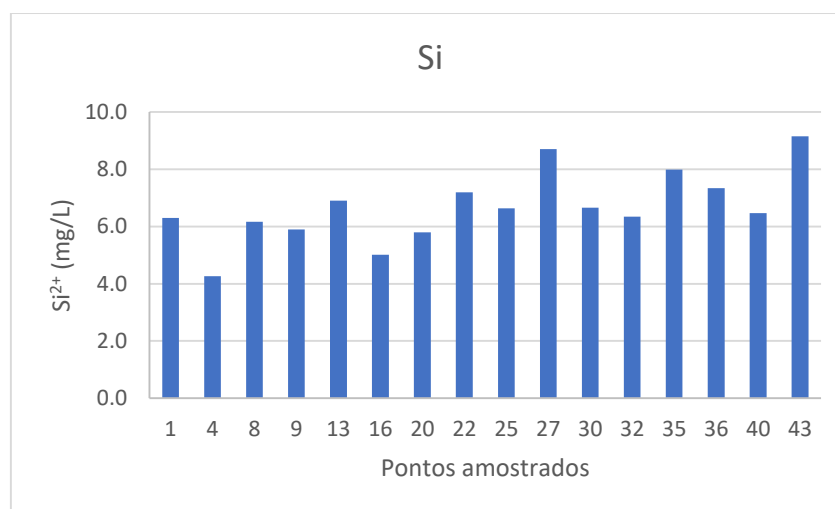


Figura 64- Variação da quantidade de sílica (mg/L) nos pontos de água amostrados.

Tabela 21 - Dados estatísticos das quantidades de sílica (mg/L) nos pontos de água amostrados.

Mínimo	4,3
Máximo	9,2
Média	6,7
Mediana	6,5
Desvio padrão	1,21
Coefficiente de variação	18,06
Número de determinações	16

A partir da Figura 64 observa-se que a concentração de sílica presente nesta água subterrânea varia entre 4,3 mg/L e 9,2 mg/L, sendo o valor médio de 6,7 mg/L (Tabela 21). Assim, os teores de sílica registados enquadram-se nas águas naturais, apresentando teores entre 1 e 40 mg/L (Figura 64).

6.2.8. Componente vestigiária

Os "iões menores" e "iões traço" refere-se a solutos encontrados em águas naturais com concentrações inferiores a 1 mg/L (Hem, 1985). A análise destes elementos menores e/ou traço em águas naturais visa identificar e compreender algumas das reações que podem ocorrer na água (Puga, 2016).

Neste trabalho foi analisada a componente vestigiária relativa aos seguintes elementos: estrôncio, ferro, manganês, boro, lítio e arsénio.

Estrôncio (Sr^{2+})

As propriedades químicas deste elemento são semelhantes às do Ca^{2+} , podendo substituir parcialmente o K^+ em diversos minerais constituintes das rochas ígneas, como o feldspato e a mica (Hem, 1985). Os minerais ricos neste íon são a estroncianite e a celestite (Reimann e Caritat, 1998).

Normalmente, na água subterrânea, ocorre em baixo teor, porém pode atingir concentrações na ordem das dezenas de mg/L, como em meios vulcânicos (Reimann e Caritat, 1998).

Na Figura 65 está representada a variação do teor de estrôncio na água subterrânea da Montanha da Penha.

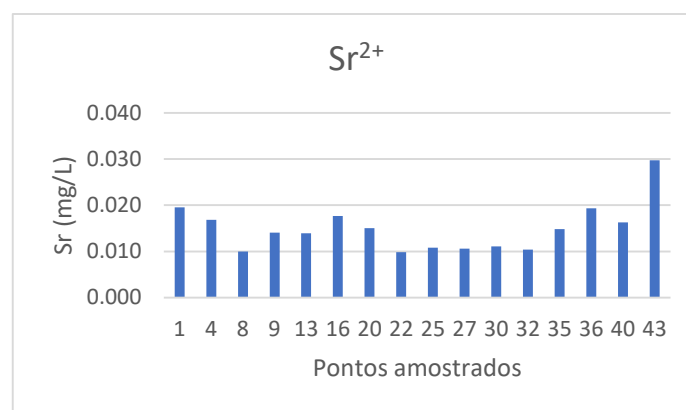


Figura 65- Variação da quantidade de estrôncio (mg/L) na água subterrânea.

A concentração deste íon na água subterrânea é, no geral, baixa, com um valor máximo de 0,0030 mg/L registado na água da mina 43.

Ferro (Fe^{2+})

Normalmente, a concentração de carbonatos controla a solubilidade do íon ferroso (Fe^{2+}); como a água subterrânea é frequentemente anóxica, o ferro solúvel geralmente ocorre no estado ferroso (Clesceri *et al.*, 1998). Quando exposto ao ar ou ambiente oxidante, o ferro ferroso é oxidado na forma férrica (Fe^{3+}), e o ferro férrico apenas é solúvel em água quando os valores de pH são baixos. Segundo Custodio & Llamas (1983), algumas das fontes de ferro na água são a dissolução de minerais silicatados, sulfetos e óxidos de ferro.

A concentração de ferro presente na água subterrânea é muito baixa, abaixo de 0,1 mg/L, sendo o máximo observado de 0,011 mg/L (Figura 66). Nas minas 13 e 16 o teor de ferro está abaixo do limite de deteção.



Figura 66- Variação da quantidade do ião ferroso (mg/L) presente nos pontos amostrados.

Normalmente, a concentração de ferro presente na água é geralmente pequena (Hem, 1985). Nas águas subterrâneas, o Fe^{2+} tem teores entre 0 e 10 mg/L (Custodio & Llamas, 1983), pelo que os pontos de água amostrados enquadram-se neste intervalo de valores. Também, a partir da Figura 66 é bem notável que a concentração mais elevada deste ião está presente no ponto 36, localizado numa zona habitacional, enquanto as concentrações mais baixas se encontram em pontos localizados em zonas florestal e agrícola. Este facto poderá indicar que a atividade humana poderá afetar a qualidade desta água subterrânea, podendo potenciar a que haja uma contaminação muito baixa e/ou difusa.

Manganês (Mn^{2+})

O manganês apresenta um comportamento semelhante ao do ferro (Custodio & Llamas, 1983). Ocorre no estado reduzido de Mn^{2+} , mas oxida facilmente e é instável na presença de ar (Feitosa & Filho, 2000). De acordo com Reiman e Caritat (1998), as principais fontes de manganês no ambiente resultam da alteração de rochas (como por exemplo, pirolusite ou rodocrosite), poeiras transportadas pelo vento, agricultura (através de fertilizantes), circulação de veículos (agente substituto de chumbo no combustível), mineração e indústrias de fundição. No entanto, as fontes geológicas são geralmente mais importantes que as antropogénicas. A concentração de Mn na água é normalmente inferior a 0,2 mg/L e, raramente, excede 1 mg/L, embora em águas ácidas, a sua concentração é mais elevada (Custodio & Llamas, 1983).

A concentração de manganês na água subterrânea ocorre abaixo do limite de deteção na água das minas 1,9,22,25,27,30,32,35 e 40. A concentração de manganês na água subterrânea está abaixo de 0,020 mg/l (Anexo 6), sendo um valor muito inferior aos considerados normais propostos por Custodio & Llamas (1983).

Boro (B)

O boro é normalmente considerado como um elemento vestigial na água subterrânea, uma vez que é identificado em reduzida concentração. No entanto, a contaminação por boro é um problema grave em muitos locais da região do Mediterrâneo. O boro na água subterrânea não apenas limita o uso para abastecimento público e para irrigação, como também pode contribuir para a ineficácia das estratégias de tratamento de água (Palmucci & Rusi, 2014).

Este ião ocorre naturalmente na água subterrânea em quantidades inferiores a algumas centenas de $\mu\text{g/L}$ (Ravenscroft & McArthur, 2004). O enriquecimento de B no abastecimento de água tem sido uma

preocupação desde há muito tempo (OMS, 1993; 1998); e pode estar associado à influência hidrotermal nas águas infiltradas (Hem, 1985), poluição humana (Bassett *et al.*, 1995; Barth, 1998; Vengosh, 1998), dissolução de evaporitos (Hem, 1985), presença de água do mar residual e intemperismo mineral. O excesso de B na água de irrigação é particularmente perigoso (Leyshon & Jame, 1993), pois muitas culturas têm uma faixa de tolerância estreita para este elemento químico (Maas, 1986; Gupta, 1993).

A concentração de boro na água subterrânea varia entre 0,014 e 0,036 mg/L (Anexo 7), enquadrando-se este intervalo de valores proposto por Ravenscroft & McArthur (2004).

Lítio (Li⁺)

O lítio ocorre naturalmente na água subterrânea como resultado da interação entre a água e os minerais, assim como, da mistura de água meteórica com fluidos salinos que contêm lítio. O lítio está tipicamente presente na água da chuva em níveis traço (0,1 a 1,0 µg/L) (Poissant *et al.*, 1994). A evaporação e a interação água-rocha podem fazer com que a concentração de lítio em águas meteóricas e salinas aumente (Dresel & Rose, 2010; Meredith *et al.*, 2013; Rosen *et al.*, 2020). Está presente em minerais como a espodumena, lepidolite, petalite, ambligonite, montebrasite e a eucryptite. Normalmente, a concentração de lítio apresenta um valor médio de 30 ppm, em granitos, e 0,18 ppm, em água marinha (Reimann & Caritat, 1998).

A água subterrânea analisada regista teores de Li⁺ que variam entre 0,007 mg/L e 0,009 mg/L (Anexo 8), ocorrendo este ião na água das minas 35,36,40 e 43, que se localizam na parte final da encosta noroeste da Montanha da Penha. A água das restantes minas apresenta teores de lítio abaixo do limite de deteção.

Arsénio (As⁻)

O Arsénio está na natureza, em minerais como os sulfuretos e os arsenatos, tais como arsenopirite, realgar e orpimento. Outros minerais como o feldspato, magnetite, ilmenite, pirite, galena, blenda e apatite podem conter o elemento na sua composição (Reimann & Caritat, 1998).

O teor médio deste elemento na água subterrânea é de 0,2 µg/L (≈ 0,002 mg/L; Reimann & Caritat, 1998). Na água subterrânea a concentração de arsénio está abaixo do limite de deteção.

6.2.9. Qualidade da água para consumo humano

De modo a perceber se esta água é própria para consumo humano agrupou-se os valores legislados pela legislação nacional (Decreto - Lei número 306/2007, de 27 de agosto) e pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2017) no Anexo 9.

A partir destes valores é possível constatar que, para a maioria dos parâmetros físico químicos como para os catiões e aniões, bem como a componente vestigiária, os intervalos de valores obtidos enquadram-se nos valores regulados pela legislação.

Alguns dos valores de pH obtidos na água, principalmente na campanha de campo que decorreu em junho de 2022, são a exceção, pois alguns pontos registam valores abaixo do valor mínimo apresentado na legislação.

6.2.10. Fáceis hidroquímicas

De modo a facilitar a visualização dos resultados, particularmente para a comparação das características físico-químicas da água de uma mesma área, é possível recorrer a representações gráficas ou diagramas. Estes diagramas permitem observar flutuações temporais ou espaciais, assim como demonstrar correlações entre os iões constituintes de um determinado corpo de água (Custodio & Llamas, 1983).

No estudo hidrogeológico da região da Montanha da Penha, recorreu-se à projeção das amostras de água subterrânea nos diagramas de Piper e Stiff, para ilustrar a tipologia hidroquímica da água em estudo, bem como, a sua distribuição espacial. O diagrama de Piper é um diagrama trilinear que representa os valores de aniões e catiões da água, expressos em %, projetados em dois triângulos distintos. Um campo central, em forma de losango, representa um terceiro ponto obtido a partir da projeção dos pontos marcados nos dois triângulos relativos aos aniões e catiões, respetivamente (Figura 84). Este diagrama compara e categoriza vários grupos de água tendo por base os iões dominantes na amostra de água (Carvalho, 2013).

O maior benefício desta representação gráfica, é que permite exibir um grande número de análises químicas, tornando óbvia e imediata a identificação de águas geoquimicamente relacionadas, pois circundam uma área claramente definida (Custodio & Llamas, 1983).

Na Figura 67 é apresentada a projeção da água subterrânea da Montanha da Penha no diagrama de Piper. A *facies* hidrogeoquímica predominante na água subterrânea é do tipo cloretada-sódica.

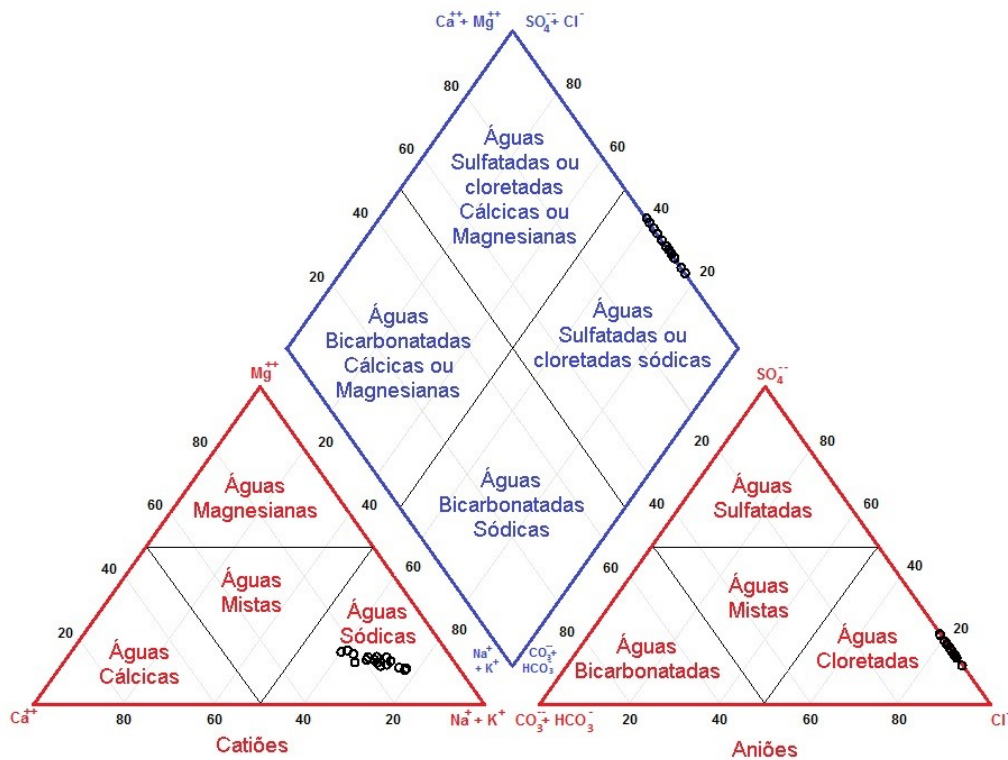


Figura 67- Classificação da água subterrânea no diagrama de Piper, para a campanha de campo de junho de 2022.

O diagrama de Stiff é um diagrama hidrogeoquímico que representa graficamente a concentração dos cátions: $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} e Mg^{2+} , assim como, dos ânions: Cl^- , HCO_3^- e SO_4^{2-} , em meq/L. Contém três paralelos, horizontais, e linhas igualmente espaçadas cortadas por uma linha vertical, dividindo o campo dos cátions para um lado e o dos ânions para o outro. Ao unir as extremidades dessas três linhas retas, é gerado um polígono característico para cada uma da água analisada (Freeze & Cherry, 1979). Na Figura 68 apresenta-se a distribuição espacial dos pontos de água amostrados juntamente com o respetivo diagrama de Stiff para a água subterrânea de cada local amostrado. A projeção das amostras de água subterrânea revelam formas típicas de águas com concentrações baixas de componentes dissolvidos.

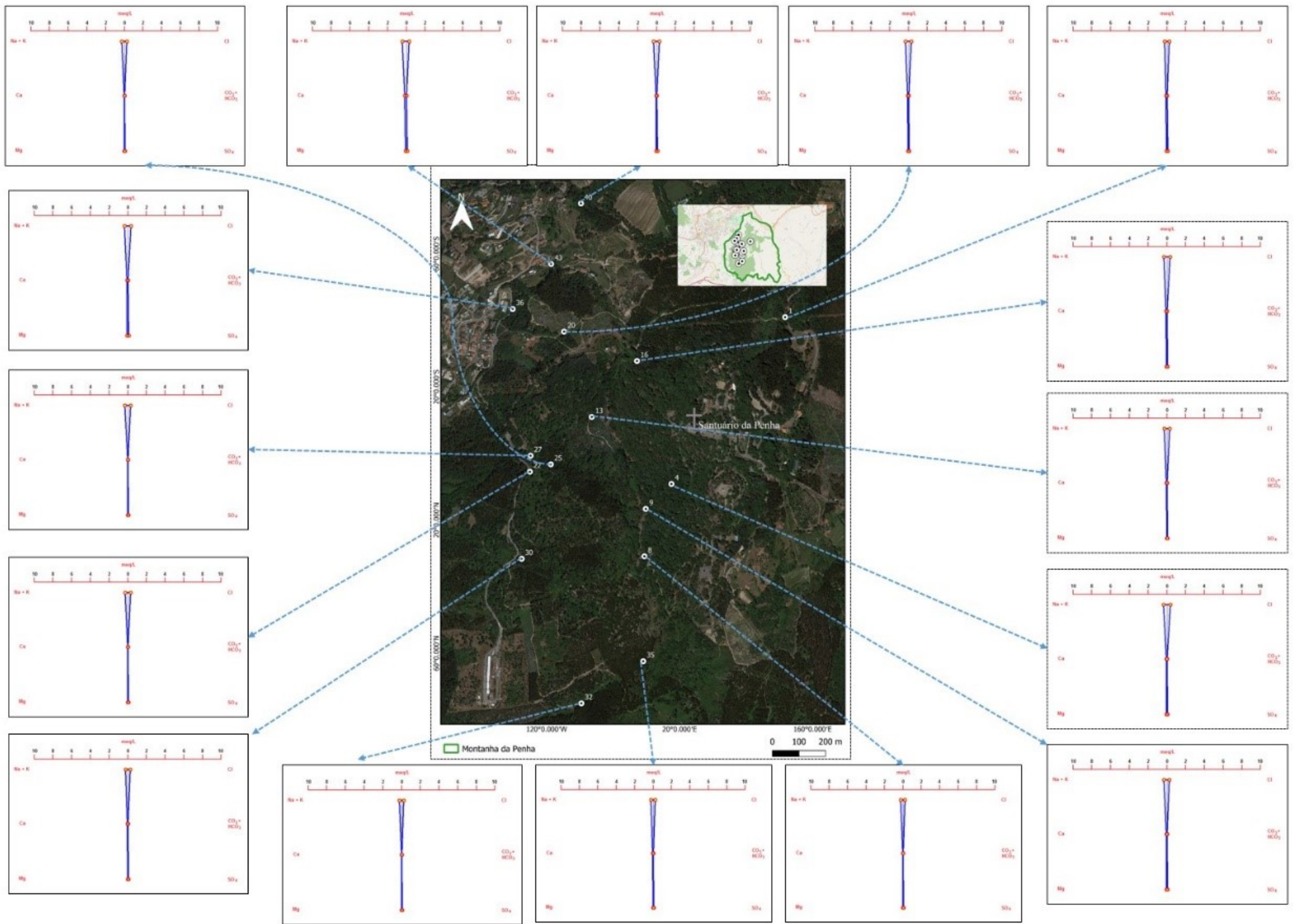


Figura 68- Projeção da composição química das amostras de água subterrânea no diagrama de Stiff.

6.3. Caracterização Isotópica

Nos últimos anos, a aplicação de isótopos naturais em estudos hidrogeológicos tem sido notória, evidenciando-se um grande aumento a partir dos anos 50 (Século XX), uma vez que ocorrem na atmosfera e na hidrosfera em concentrações variáveis, sendo essas concentrações não controláveis pelo Homem (Guerra, 2015).

Os isótopos estáveis de oxigénio e hidrogénio são excelentes marcadores para identificar a origem da água e caracterizar os sistemas hídricos (Kendall & McDonnell, 1998), bem como identificar potenciais processos de mistura entre diferentes águas e reconhecer possíveis direções de fluxo (Clark e Fritz, 1997). Como têm um comportamento conservativo, tornam-se úteis como traçadores, caso não sejam sujeitos a fatores modificadores externos ao próprio sistema, como por exemplo a ocorrência de processos de evaporação e mistura com águas de diferentes origens (Kendall & McDonnell, 1998). A concentração destes isótopos não é alterada significativamente através da ocorrência de interações com componentes biológicos e geológicos ao longo do seu fluxo subterrâneo (Kendall & McDonnell, 1998). A quantidade e variabilidade isotópica de um soluto presente numa determinada amostra de água pode revelar detalhes sobre as reações que são responsáveis pela sua presença (Kendall & McDonnell, 1998; Gat, 1981), bem como acerca do sentido de fluxo.

A diferença nas taxas de reação das moléculas de água compostas de vários isótopos e o fracionamento isotópico resultante é a base para a utilização de isótopos ambientais (Wempe, 2022). O fracionamento de Rayleigh é o processo pelo qual os isótopos mais pesados são eliminados ao longo do tempo, o que faz com que os isótopos de água em uma massa de ar se tornem gradualmente mais empobrecidos, impulsionando a formação da composição isotópica da água meteórica (Dansgaard, 1964). Quando uma massa de vapor em ascensão atinge altitudes mais elevadas, esta arrefece gradualmente, libertando a chuva da massa de vapor. Devido ao fracionamento de Rayleigh, a precipitação será reduzida isotopicamente em altitudes mais elevadas com temperaturas médias mais baixas (Figura 69). Este “efeito altitude” é utilizado para estimar a altitude de recarga das águas subterrâneas, bem como para compreender a interligação dos corpos hídricos subterrâneos (Wempe, 2022). O gradiente dependente da altitude para os valores de precipitação dos isótopos de oxigénio-18 ($\delta^{18}\text{O}$) e deutério ($\delta^2\text{H}$) está entre -0,15 e -0,50 ‰, por cada 100 m, para o isótopo $\delta^{18}\text{O}$, e entre -1 e -4 ‰, por cada 100 m, para o $\delta^2\text{H}$ (Clark e Fritz, 1997).

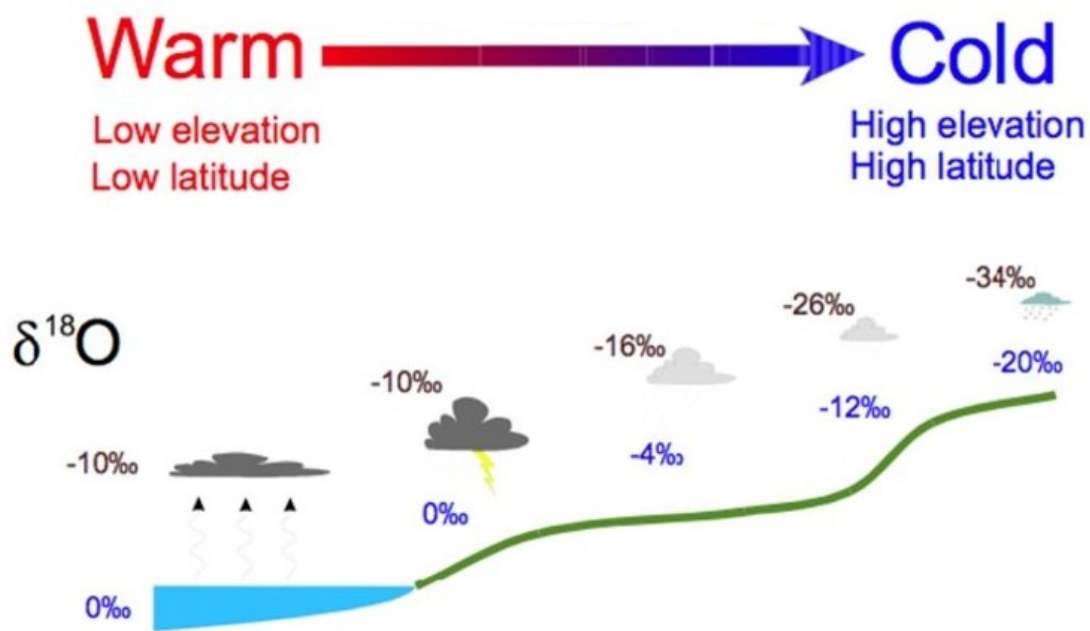


Figura 69- Processo de fracionamento de Rayleigh (UWPCC, 2022).

Atualmente, o valor de referência mundial utilizado nos trabalhos de hidrologia isotópica para os isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ é o valor de referência V-SMOW (Vienna – Standard Mean Ocean Water). Nos laboratórios da Secção de Hidrologia Isotópica da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), em Viena (Áustria), desenvolveu-se o padrão V-SMOW, que pretende representar o valor médio da composição isotópica dos oceanos. Cerca de 97% da água na hidrosfera ocorre nos oceanos, e a sua composição isotópica geral é bastante homogênea, com valores composicionais, tanto para $\delta^{18}\text{O}$ quanto $\delta^2\text{H}$, próximos de zero (0 ‰) (Gonfiantini, 1981; Clark & Fritz, 1997; Mook, 2000).

Após uma análise metódica de águas de precipitação, primeiramente Craig (1961) definiu a reta meteórica global, sendo posteriormente refinada por Rozanski *et al.* (1993), que estabeleceram uma relação linear entre os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$. Essa relação é representada através da equação que define a reta meteórica global (GMWL):

$$\delta^2\text{H} = 8.13 \delta^{18}\text{H} + 10.8 \text{‰ VSMOW}$$

Esta equação corresponde ao melhor ajuste linear dos pontos relativos à composição isotópica de amostras de água de origem exclusivamente meteórica. Deste modo, percebe-se que a composição isotópica de uma água puramente meteórica deverá obedecer à equação anterior, projetando-se sobre ou próximo da reta meteórica global.

A conclusão mais significativa que se pode obter através da reta meteórica global (GMWL) é que águas isotopicamente empobrecidas estão relacionadas com regiões frias e águas enriquecidas isotopicamente são associadas a regiões mais quentes. É, também, uma importante ferramenta para identificar os locais de recarga da água subterrânea e funciona como um guia para a identificação da origem da água subterrânea (Clark & Fritz, 1997). Por exemplo, uma água juvenil não será projetada próximo da reta meteórica local (GMWL) e terá uma composição isotópica totalmente distinta de uma água não meteórica (Marques *et al.*, 2010). Além disso, é possível estimar processos de mistura entre várias fontes de água (Wempe, 2022).

As análises isotópicas da água subterrânea da Montanha da Penha obtidas na campanha de junho de 2022 variam entre -5,36 e -5,12 ‰, para o $\delta^{18}\text{O}$, e entre -28,86 a -27,38 ‰, para o $\delta^2\text{H}$, com um teor médio no sistema de água subterrânea de $\delta^{18}\text{O}$: -5,2‰ e $\delta^2\text{H}$: -28,1 ‰ (Tabela 22) em relação à Água Média do Oceano Padrão de Viena (V-SMOW).

Na Figura 70 apresenta-se um diagrama com a projeção dos valores de $\delta^2\text{H}$ em função de $\delta^{18}\text{O}$ e sua comparação com a reta meteórica global, de forma a inferir sobre uma possível origem para a água subterrânea.

Tabela 22 - Dados estatísticos para as análises isotópicas de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ na água subterrânea da Montanha da Penha.

	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
Mínimo	-28.86	-5.36
Máximo	-27.38	-5.12
Média	-28.12	-5.23
Mediana	-27.98	-5.24
Desvio Padrão	0.45	0.08
Coefficiente de Variação (%)	-1.61	-1.46
Nº de determinações	16	16

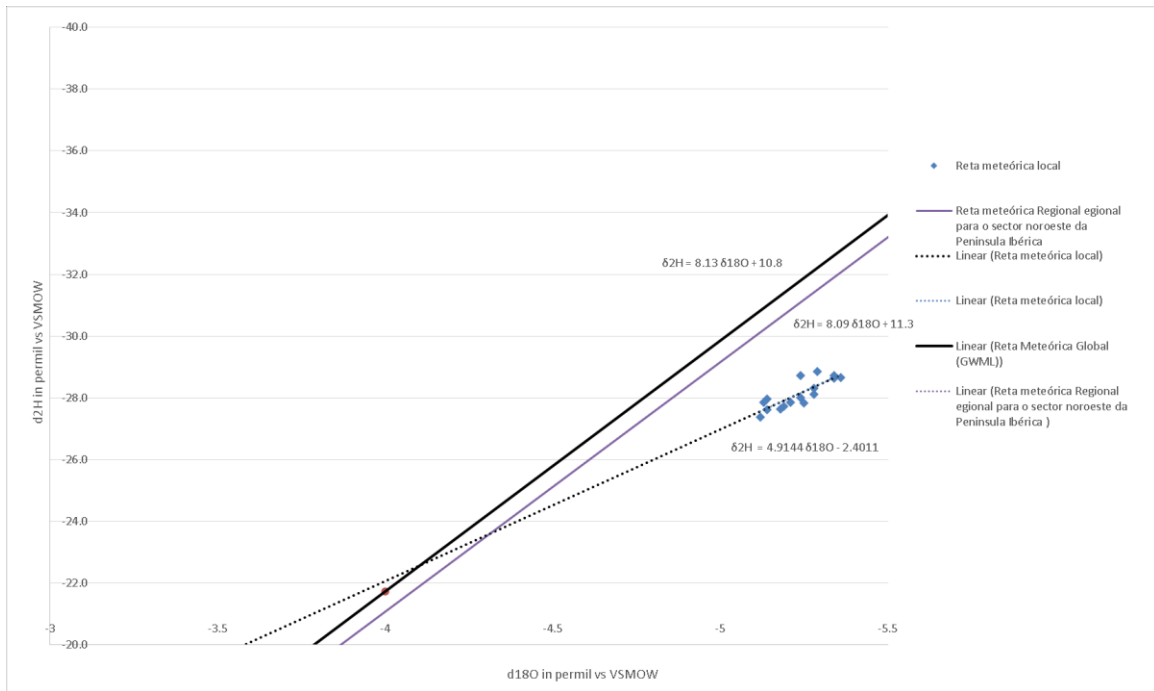


Figura 70- Diagrama de dispersão para a composição isotópica de $\delta^2\text{H}$ em função de $\delta^{18}\text{O}$ na água subterrânea da Montanha da Penha. Projetou-se ainda a reta meteórica global ($\delta^2\text{H} = 8.13 \delta^{18}\text{O} + 10.8$) e a reta meteórica regional do setor noroeste da Península Ibérica (Oliveira & Lima, 2007).

A partir da Figura 70 observa-se que os valores determinados estão muito próximos da reta meteórica global, assim como da reta meteórica regional do setor noroeste da Península Ibérica, indicando que a água subterrânea do sistema hidrico da Montanha da Penha é de origem meteórica, ou seja, esta água provém da precipitação local registada na área de estudo. É, também, possível constatar que a reta meteórica local apresenta um declive menor relativamente à reta meteórica global, indicando que estas amostras sofreram uma ligeira evaporação com fracionamento isotópico (Guerra, 2015) antes de serem infiltradas para níveis subterrâneos (Figura 71).

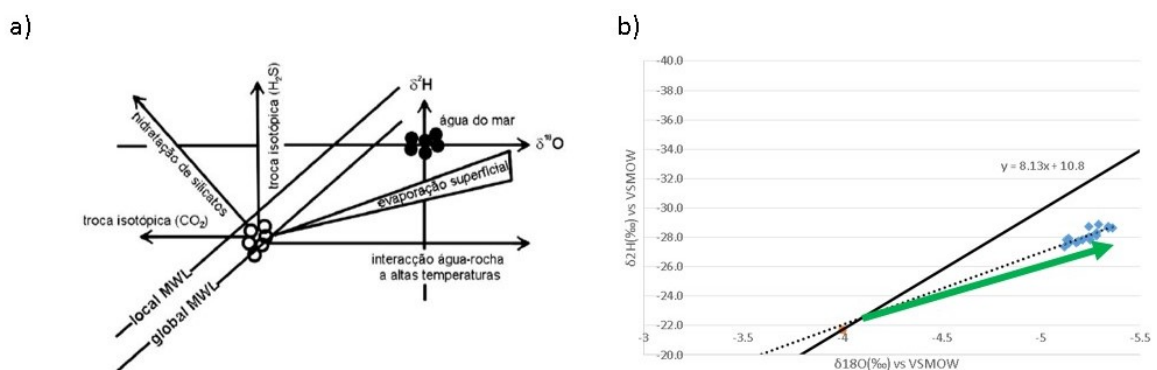


Figura 71- Esquemas demonstrativos dos vários processos que podem provocar desvio nos valores $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$: a – em relação à reta das águas meteóricas mundiais (local MWL – reta das águas de precipitação Mediterrânica; global MWL – reta das águas meteóricas mundiais; Adaptado de Geyth (2000) in: Marques et al. (2012); b - em relação à GMWL que ocorre nas águas da área em estudo, em que ocorre uma ligeira evaporação com fracionamento isotópico (Guerra, 2015).

A representação gráfica da altitude em função da concentração de $\delta^{18}\text{O}$ permite estimar a altitude média de recarga da água subterrânea na região da Montanha da Penha (Figura 72). Como referido anteriormente, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ variam entre -5,36 ‰ e -5,12 ‰, respetivamente, pelo que e tratando-se de um fluido de mistura, a estimativa da altitude média de recarga deverá ser efetuada com base no teor mais leve de $\delta^{18}\text{O}$ (Lima, 2011).

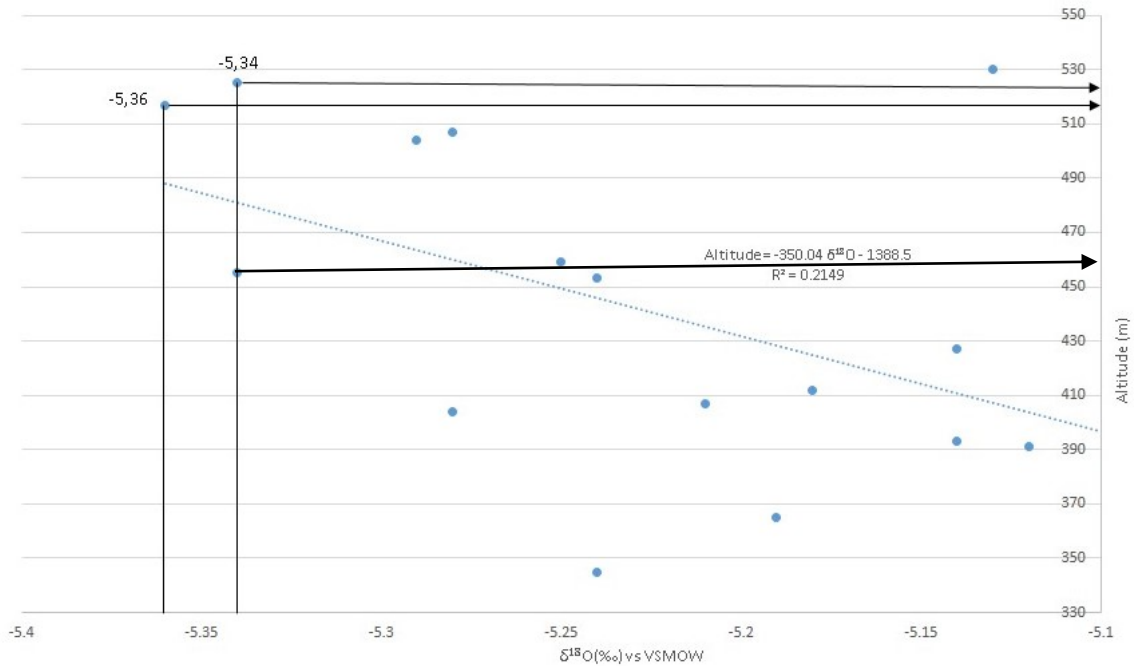


Figura 72- Diagrama de dispersão da altitude em função de $\delta^{18}\text{O}$ obtido na água subterrânea da Montanha da Penha.

Como os teores mais leves de $\delta^{18}\text{O}$ são valores muito próximos entre si (Anexo 10) consideram-se os dois valores de -5,34 ‰ e -5,36 ‰. Assim, através da representação gráfica, é possível constatar que a área de recarga estimada se localiza a uma altitude compreendida entre 455 e 525 metros (Figura 72).

A partir dos dados hidrogeoquímicos e isotópicos obtidos é possível elaborar a proposta de um modelo concetual da água subterrânea que circula na Montanha da Penha.

Um modelo concetual é uma representação simplificada de um determinado sistema aquífero no seu ambiente geológico (Albu *et al.*, 1997; Kresik & Mikszewski, 2013), sendo uma “ferramenta” bastante reconhecida em hidrogeologia. Trata-se de uma representação simplificada das unidades hidrogeológicas e do sistema de fluxo da água subterrânea (Betancur & Palacio, 2012).

Na Figura 73 está o modelo concetual para a água subterrânea da Montanha da Penha.

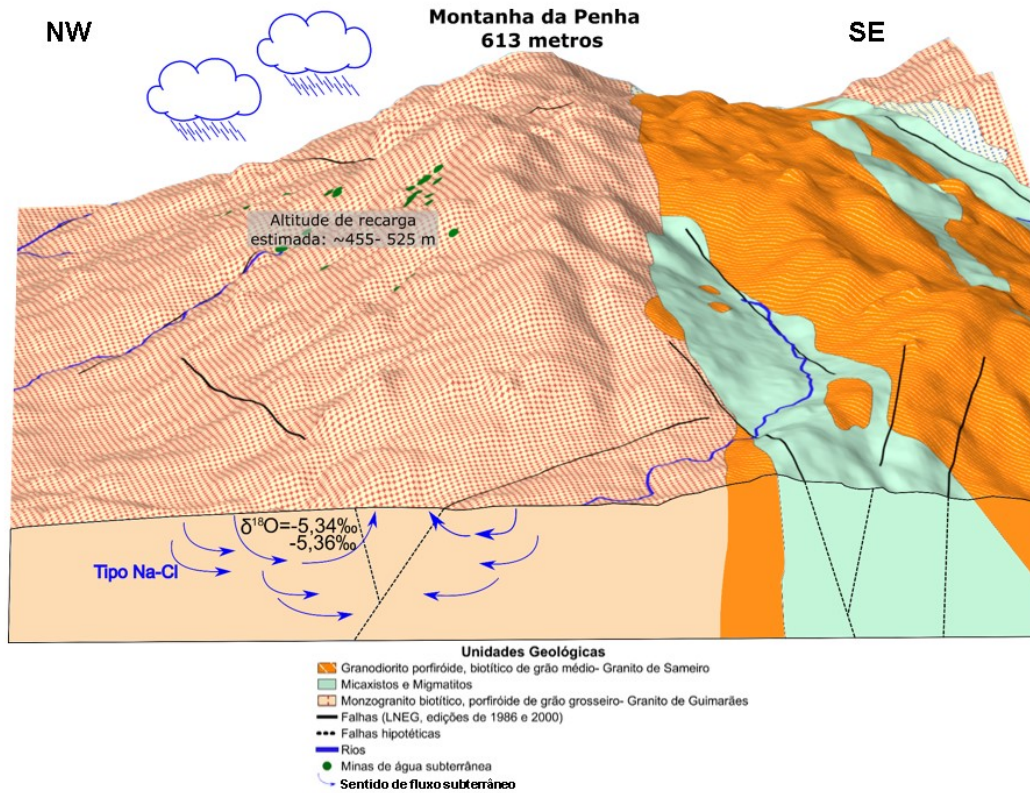


Figura 73- Modelo conceitual de fluxo da água subterrânea da Montanha da Penha. As linhas a tracejado representam trajetos hipotéticos no subsolo e têm apenas propósitos ilustrativos. O modelo de superfície 3D foi criado usando o plugin QGIS "Qgis2threejs".

Como já referido anteriormente, foi possível constatar que a água que circula neste sistema hídrico tem origem na precipitação atmosférica local, ocorrendo a sua infiltração em locais com relevo, entre o 455 e 525 metros, área assinalada na Figura 73. Esta representação coloca a hipótese de que à medida que a água de precipitação se infiltra, que pode ocorrer por intermédio das possíveis falhas locais, é favorecida a ocorrência de processos de interação água- rocha em profundidade.

7. Conclusões

Este trabalho de investigação no âmbito dos Recursos Hídricos e da Hidrogeologia iniciou-se com o estudo das minas de água subterrânea da Montanha da Penha, procurando caracterizar detalhadamente a água que circula neste local. Na região, as características geológicas, combinadas com a elevada precipitação e a permeabilidade do solo, são as principais fontes de recarga do sistema aquífero da Montanha da Penha, o qual apresenta características únicas e particulares. É um sistema aquífero do tipo fissurado, devido à predominância de rochas graníticas na área de estudo, mais concretamente, o granito de Guimarães.

O sistema de minas de água subterrânea da Montanha da Penha continua a abastecer de água a cidade de Guimarães, preservando as suas propriedades naturais. Quantitativamente, estas minas de água apresentaram uma produtividade hídrica média de 0,17 L/s. Estes resultados refletem a seca que se fez sentir no ano de 2022, em que se registou uma precipitação local reduzida, com valores atípicos; refletindo-se numa diminuição drástica do caudal de água deste sistema de água subterrânea.

Do ponto de vista hidrogeoquímico, é possível concluir que a água subterrânea da Montanha da Penha é adequada para o consumo humano e, também, para outros usos, como por exemplo para irrigação agrícola. De um modo geral, é uma água classificada como fria a normal, com um valor de pH ácido a neutro, pouco mineralizada e um baixo teor de sólidos totais dissolvidos; podendo indicar uma recarga local associada a um regime de fluxo curto e pouco profundo. Na colheita realizada em junho de 2022, a fácies hidroquímica dominante é do tipo cloretada-sódica. As concentrações mais elevadas de sulfato e nitrato na água subterrânea ocorrem nos pontos de água localizados na parte sul deste sistema hídrico, numa zona em que predomina a ocorrência de habitações; sugerindo que a presença humana poderá ser um entrave para a manutenção da qualidade desta água para consumo humano.

Os resultados isotópicos indicam que a água subterrânea da Montanha da Penha é de origem meteórica, significando que esta água está associada à precipitação local. Estes resultados mostram, ainda, que a área de recarga estimada deste sistema hídrico se localiza a uma altitude entre 455 e 525 metros, cuja infiltração preferencial ocorre a partir do sistema de falhas e fraturas das rochas graníticas, favorecendo os processos de interação água - rocha em profundidade.

Com este trabalho pode concluir-se que a determinação de isótopos ambientais, em conjunto com as técnicas hidrogeológicas clássicas, como a geologia, geoquímica e hidrogeologia, são fundamentais para um maior e melhor conhecimento detalhado dos sistemas aquíferos, neste caso do sistema de minas de água subterrânea da Montanha da Penha. A água deste sistema aquífero é própria para consumo

humano, sendo este um importante contributo para o plano de desenvolvimento sustentável de Guimarães.

De salientar, que a conclusão deste trabalho não finaliza o estudo hidrogeológico na área de estudo. Contrariamente, esta investigação evidencia novas possibilidades de investigação científica, assim como a definição de melhorias que poderão ser implementadas, para uma caracterização mais completa e detalhada deste sistema hídrico e sua evolução espaço-temporal.

Neste sentido, são apresentadas algumas propostas de possíveis avanços futuros que incluem:

- estudos geofísicos, especialmente através da aplicação de métodos geoelectricos, de modo a representar a distribuição espacial do fluxo de circulação da água no subsolo;

- determinação dos isótopos trítio e carbono - 14 (^{14}C) nas águas subterrâneas, permitindo obter informações mais precisas sobre o tempo de residência da água no reservatório de água subterrânea;

- realização de um estudo detalhado relativo a possíveis perdas de água no sistema e caso existam, quais as principais causas associadas e medidas de minimização dos seus efeitos (por exemplo, presença de infraestruturas bastante antigas e possível redução com substituição da tubagem);

- realização de campanhas de monitorização anuais periódicas regulares (pelo menos duas vezes por ano), de modo a avaliar a variabilidade espacial e temporal da água subterrânea, e sua adequabilidade para consumo humano e rega de terrenos agrícolas, principalmente nas zonas habitacionais, com teores mais elevados de nitratos e sulfatos na água subterrânea;

- aplicar semelhante metodologia nas restantes captações de água subterrânea da cidade de Guimarães, e seu contributo para o abastecimento público de Guimarães, de modo a obter mais informação relevante para o Plano de Desenvolvimento Sustentável de Guimarães;

- realização de uma cartografia simplificada, de modo a produzir um mapa geológico simplificado da área de estudo. Este mapa irá permitir:

- 1) compreender o sistema filoneano existente na área e evidenciar estruturas geológicas locais,

- 2) perceber se a antiga exploração mineira de estanho e volfrâmio que existiu no passado (encerrada há aproximadamente duas décadas) intersesta o sistema de minas de água subterrânea da Montanha da Penha, podendo este interferir e relacionar-se com os teores de alguns iões (como é o caso dos sulfuretos).

Após a realização deste mapa geológico, colocar sob o mesmo o traçado das minas que compõem este sistema hídrico, de modo a perceber que tipo de estruturas e formações geológicas estão a ser atravessadas e de que forma podem influenciar os resultados obtidos;

- de modo a proteger e preservar estas captações de água subterrânea, que têm contribuído ao longo dos anos para o abastecimento público de Guimarães, deverá ser adicionado um ponto ao Plano Diretor Municipal de Guimarães (atualmente a sofrer algumas atualizações), de modo a proteger estas captações, bem como a área de recarga deste sistema hídrico. Para tal, deverá ser realizada uma consulta à legislação/ normas sobre a proteção dos recursos hídricos em vigor, no que diz respeito aos perímetros de proteção das captações.

8.Referências bibliográficas

- Adams, S.; Titus, R; Pietersen, K.; Tredoux, G.; Harris, C. (2001). Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa. *Journal of Hydrology*, vol 241 (1-2). Elsevier, pp. 91- 103.
- Afonso, M. J., Chaminé, H. I., Marques, J. M., Carreira, P. M., Guimaraes, L., Guilhermino, L., Gomes, A., Fonseca, P. E., Pires, A. & Rocha, F. (2010). Environmental issues in urban groundwater systems: a multidisciplinary study of the Paranhos and Salgueiros spring waters, Porto (NW Portugal). *Environmental Earth Sciences*, 61(2), 379-392.
- Albarède, F. (2003). *Geochemistry – An Introduction*. 251 pp. Cambridge University, Press.
- Albu, M.; Banks, D.; Nash, H. (1997). *Mineral and thermal groundwater resources*. Chapman and Hall, London
- Ali, S. A., & Ali, U. (2018). Hydrochemical characteristics and spatial analysis of groundwater quality in parts of Bundelkhand Massif, India. *Applied water science*, 8(1), 1-15.
- Almeida, C.; Mendonça, J. J. L.; Jesus, M. R., & Gomes, A. J. (2000). Sistemas aquíferos de Portugal continental. *Centro de Geologia da Fac. Ciências Univ. Lisboa, Instituto da Água*, 3.
- Andrade, M., Noronha, F., Rocha, A. 1986. Carta Geológica de Portugal, folha 9-B de Guimarães, à escala 1:50000. Instituto Geológico e Mineiro (IGM, atual Laboratório Nacional de Energia e Geologia- LNEG), Lisboa.
- Andrade, M., Sodré Borges F. & Noronha F. (1985). Livro - Guia das excursões a realizar em Portugal - Excursão geológica na região entre Douro e Minho. IX Reunião de Geologia do Oeste Peninsular, Museu e Laboratório de Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 35 p.
- Anuário Estatístico da Região Norte (2018). Instituto Nacional de Estatística, I.P. ISSN 0871-911-x. pp. 561
- Antunes, I. M. H. R., & Gonçalves, L. M. B. (2019). The “Sete Fontes” groundwater system (Braga, NW Portugal): Historical milestones and urban assessment. *Sustainable Water Resources Management*, 5(1), 235-248.
- Appelo, C., Postma, D. (2010). – *Geochemistry, groundwater and pollution*, 2.^a ed, CRC Press, Amsterdão, 649 pp.
- Arneith, A., Barbosa, B., Benton, T., Calvin, K., Calvo, E., Connors, S., Cowie, A. ... & Zommers, Z. (2019). Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Geneva, pp. 41.
- Atlas do Ambiente (2003). *Atlas Digital do Ambiente*. Instituto do Ambiente.

- Azevedo, J.M.M. (1998). Geologia e hidrogeologia das Flores (Açores- Portugal). vol 1 e 2. Departamento Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 403 pp. (Tese de doutoramento.)
- Barth, S., 1998. Application of boron isotopes for tracing sources of anthropogenic contamination in groundwater. *Water Res.* 32, 685 – 690.
- Bassett, R.L., Buszka, P.M., Davidson, G.R., Chong-Diaz, D., 1995. Identification of groundwater solute sources using boron isotope composition. *Environ. Sci. Technol.* 29, 2915 – 2922.
- Brás, F. P. (2020). *Caracterização das águas subterrâneas e dos seus percursos na Colina do Castelo: contributo para a valorização do património hidrogeológico* . Universidade de Lisboa (Portugal). pp.88. (Dissertação de Mestrado)
- Beckie, R. D. (2013). Groundwater. The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada. *Elsevier inc.*
- Bento-Gonçalves, A.; Vieira, A.; Costa, F.; Ferreira-Leite, F.; Marçal, V. (2014), Manifestações de Riscos no Noroeste de Portugal – Livro Guia da Viagem de Estudo do III Congresso Internacional de Riscos, RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança.
- Betancur, T. & Palacio, C. A. (2012). Conceptual Models in Hydrogeology, Methodology and Results. *Hydrogeology – A global perspective*. Edited by KAZEMI, G. A, 203-222.
- Calado, C. (2001). A ocorrência de água sulfúrea alcalina no Maciço Hespérico. Quadro hidrogeológico e quimiogénese. Tese de Doutoramento. Universidade de Lisboa. 497pp.
- Caria, C. G. (2012). *Estudo da recarga de águas subterrâneas do concelho de Almada* . Universidade de Lisboa. pp. 124.(Dissertação de Mestrado).
- Carreira, P. M., Marques, J. M., Espinha Marques, J., Chaminé, H. I., Fonseca, P. E., Santos, F. M., Moura, R. M. & Carvalho, J. M. (2010). Defining the dynamics of groundwater in Serra da Estrela Mountain area, central Portugal: an isotopic and hydrogeochemical approach. *Hydrogeology journal*, 19(1), 117-131.
- Carrera-Hernández, J. J., Smerdon, B. D., & Mendoza, C. A. (2012). Estimating groundwater recharge through unsaturated flow modelling: sensitivity to boundary conditions and vertical discretization. *Journal of Hydrology*, 452, 90-101.
- Carvalho, S. M. R. (2014). Qualificação da Paisagem do Monte da Penha e Envolvente. Universidade do Porto. Porto. Julho 2014. pp. 117. (Dissertação de Mestrado.)

- Carvalho, A. M. M. (2013). Hidrogeologia ambiental da região do Parque Natural da Serra da Estrela (setor de Seia-Torre-Covilhã): uma abordagem multidisciplinar. Universidade do Porto e Universidade de Aveiro. pp. 336. (Tese de Doutoramento)
- Carvalho, P.C.S. (2004). Impacte ambiental de antigas explorações mineiras na região de Sarzedas-Castelo Branco. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 185 pp. (Tese de Mestrado).
- Choffat, P. (1904). Apontamentos para a História de Guimarães. Relatório sobre o abastecimento de água da cidade de Guimarães. *Revista de Guimarães*, 21 (3-4) Jan.- Mar. 1904, p. 138-167.
- Clark, I. D., & Fritz, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. United States of America: CRC Press.
- Clesceri, L.S; Greenberg, A.E; Eaton,A.D. (1998). Standar methods for the examination of Water and wastewater, Ed. 20. American Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation, Washington, pp.1.1-4.1.181.
- Comissão Europeia (2000). Diretiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Outubro de 2000 que estabelece um quadro de ação comunitária no domínio da política da água. *Jornal Oficial das Comunidades Europeias de*, 22, 1-72.
- Condesso de Melo, M.T. (2002). Modelo matemático de fluxo e transporte de massa do sistema multiaquífero Cretácico da região de Aveiro (Portugal). Tese de Doutoramento. Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro. Aveiro, 206 pp.
- Conicelli, B. P., & Hirata, R. (2016). Novos paradigmas na gestão das águas subterrâneas. *XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*.
- Correia, C. A. G. (2015). *Hidrogeologia, Hidroquímica e análise de risco dos sistemas aquíferos nas envolventes das exurgências de Montouro e de Olhos de Ferverça (Cantanhede)* Universidade de Coimbra pp. 361. (Tese de Doutoramento)
- Costa, F. (2007). Os primórdios da exploração da água: as Minas da Penha (até 1930). In Ribeiro, Célia e Neves, António Amaro das (Coord.) - "Mãed'água, Centenário do abastecimento público de Guimarães", Vimagua, Guimarães, p.94-117.
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Sciences*, 133, pp. 1833-1834.
- Cunha, L.V.; Ribeiro, L.; Oliveira R.P.; Nascimento, J. (2006). "Recursos Hídricos" in Santos, F.D. et al. (2006) – "Alterações Climáticas em Portugal, Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação" – Projecto SIAM II, Gradavia, Lisboa.
- Custódio, E.; Llamas, M. R. (1996). Hidrologia subterrânea, 2 Vols, Omega, S. A., Barcelona, 2350 pp.

Custodio, E.; Llamas, M. (1983). Hidrologia Subterranea. Vol. I e Vol. II, Edições Omega, Barcelona.

Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, XVI (4), 436-468.

Davis, S.N., DeWiest, R.J. (1966) Hydrogeology. Wiley, New York Doneen LD (1964) Notes on water quality in agriculture, water science and engineering. 4001, University of California, Davis

Despacho n.º11955/ 2018, de 12 de dezembro.

Dias, R. & Ribeiro, A. (2013). O Varisco do sector norte de Portugal. in: Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P., Kullberg, J.C. (Eds.), Geologia de Portugal (vol. 1), Escolar Editora, pp. 59-71.

Dias G., Noronha F., Almeida A., Simões P. P., Martins H.C.B., Ferreira N. (2010). Geocronologia e petrogénese do plutonismo tardi-varisco (NW de Portugal): síntese e inferências sobre os processos de acreção e reciclagem crustal na Zona Centro-Ibérica. In: Coteló Neiva J.M., Ribeiro A., Mendes Victor L., Noronha F., Magalhães Ramalho M. (Eds.). Ciências Geológicas: Ensino, Investigação e sua História, vol. I, Geologia Clássica, Publicação comemorativa do Ano Internacional do Planeta Terra, 143-160.

Dias G., Leterrier J., Mendes A., Simões P.P. & Bertrand J.M. (1998). U-Pb zircon and monazite geochronology of post-collisional Hercynian granitoids from the Central Iberian Zone (Northern Portugal).

Dresel, P., Rose, A., 2010. Chemistry and Origin of Oil and Gas Well Brines in Western Pennsylvania: Pennsylvania Geological Survey; Pennsylvania Department of Conservation and Natural Resources, Open-File Report OFOG 10-01.0 (48 p).

Edmunds, W. M., & Smedley, P. L. (2005). Fluoride in natural waters Essentials of Medical Geology ed BJ Alloway and O Selinus.

Farias, P., Gallastegui, G., González Lodeiro, F., Marquínez, J. , Martín Parra, L. M. , Martínez Catalán, J. R. , Pablo Maciá, J. G. de & Rodríguez Fernández, L. R. (1987) - Aportaciones al conocimiento de la litoestratigrafía y estructura de Galicia Central. In Actas e comunicações da IX Reunião sobre a Geologia do Oeste Peninsular. Mem . n.º 1 , Mus. Lab. Min. Geol. Fac. Ciências Univ, Porto, pp. 411-431

Feitosa, F. A. C., Manoel Filho, J., Feitosa, E. C., & Demétrio, J. G. A. (2008). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. CPRM. Terceira edição.

Feitosa, F. A. C & Filho, J. M. (2000). Hidrogeologia- conceitos e aplicações, Ed.2. Serviços Geológico do Brasil /CPRM), Fortaleza, 391 pp.

Fernandes, D.; Silva, D.; Sá, J. D.; Gonçalves, E.; Mendes, D.; Rodrigues, A.; Leitão, I.; Andrade, G.; Ferreira, S.; Ribeiro, J.; Martins, J. (2019). Penha Paisagem Protegida|Montanha da Penha | Classificação de Área Protegida | Integração na Rede Nacional de Áreas Protegidas. Floradata em parceria com a Câmara Municipal de Guimarães e a Irmandade da Penha.

Ferreira, N., Dias, G., Meireles, C.A.P. & Braga, M.A.S. (2000). Notícia Explicativa da Folha 5D-Braga da Carta Geológica de Portugal, Escala de 1/50000. Instituto Geológico e Mineiro (IGM, atualmente designado Laboratório Nacional de Energia e Geologia- LNEG), Lisboa.

Fernandes, S. C. B. (2015). Ocorrências hidrominerais sulfúreas do nordeste transmontano: variabilidade espacial e evolução geoquímica Universidade do Minho pp. 335. (Dissertação de Mestrado)

Fernandes, R. P. S. A. (2014). A estrutura verde da Penha e envolvente. Universidade do Porto. 85 pp. (Dissertação de Mestrado).

Fernandes, L. F. (1992). Hidrogeologia de Dois Importantes Aquíferos (Sabariz/Cova de Lua) do Maciço Polimetamórfico de Bragança. Universidade de Lisboa, 172 pp. (Dissertação de Mestrado)

Ferreira, S.; Frazão, M.; Fernandes, J.; Torrinha, H.; Pereira, P.; Silva, G. (2018). Plano Municipal da Defesa da Floresta contra Incêndios. Comissão Municipal de Defesa da Floresta. Câmara Municipal de Guimarães.

Ferreira N., Iglesias M., Noronha F., Pereira E., Ribeiro A. & Ribeiro M.L. (1987). Granitóides da Zona Centro Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In: Bea F. Carnicero A., Gonzalo J.C., López Plaza M., Rodriguez Alonso M.D. (Eds.), Geologia de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hespérico. Libro Homenaje a L. C. Garcia Figueirola, Ed. Rueda, Madrid, 37-51.

Fetter, C. W. (2001). Applied Hydrogeology. 4th Ed., 598 pp. Prentice Hall, New Jersey.

Field, C.B., Barros, V.R. (2014). Climate Change 2014–Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects. Cambridge University Press.

Follmann, F., Corrêa, L., & Costa, F. D. S. (2020). A classificação da Montanha da Penha como contributo para a candidatura de Guimarães Capital Verde Europeia.

Freeze, R. A.; Cherry, J. A. (1979.) Groundwater, 604 pp. Presentice Hall, Inc. New Jersey.

Fung, K., Zhang, Z., Wong, J., Wong, M. (1999). Fluoride contents in tea and soil from tea plantations and the release of fluoride into tea liquor during infusion. Environ Pollut 104:197–205

Gonçalves, E. (2016). Síntese hidrogeológica do Anticlinal de Valongo com recurso a modelo hidrogeológico conceptual.

Gonfiantini, R. (1981). The δ -notation and the mass-spectrometric measurement techniques. Em Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle (pp. 35-84). Vienna: IAEA - Technical Reports Series n° 210.

Graça, H. (2002). Controlo de Qualidade e Monitorização de Captações de Água Mineral ou de Nascente. Prospecção, Pesquisa e Captação de Águas Minerais Naturais, Recursos Geotérmicos e Águas de Nascente. IGM.

Guerra, M. (2015). Utilização de isótopos ambientais (2H, 13C, 18O, 3H e 14C) na caracterização de sistemas hidrominerais e geotérmicos do norte de Portugal (Termas de Monção e Gerês). Técnico de Lisboa. pp.76. (Dissertação de Mestrado).

Gupta, U.C. (Ed.), 1993. Boron and its Role in Crop Production. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 3–44.

Handa, B. K. (1975). Geochemistry and genesis of fluoride containing groundwater in India. *Ground Water* 13, 275–281

Heath, R. C. (1983). Basic groundwater hydrology. 2220 pp. U.S. Geological Survey Water Supply Paper.

Hem, J. D. (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. 3ª Edt. 263 pp. U.S. Geological Survey Water Supply Paper.

Hounslow, A. (1995). Water Quality Data: Analysis and Interpretation. Lewis Publishers, New York, 397 p.

Hudak, P.F. (2001). Principals of Hydrogeology. CRC Press. LLC.

INAG, 2008. Tipologia de rios em Portugal Continental no âmbito da implementação da Diretiva Quadro da Água, caracterização abiótica. Ministério do ambiente, ordenamento do território e do desenvolvimento regional, Instituto da Água, I.P.

INAG, 1997. Plano Nacional da Água, Termos de Referência e Estratégia de Elaboração, Equipa do PNA, Instituto da Água, Fevereiro.

Krauskopf, K. B., & Bird, D. K. (1995). *Introduction to Geochemistry*. 3rd ed., Mc Graw-Hill, Inc., New York, pp. 647

Kendall, C.; McDonnell, J. J.(1998). *Isotope tracers in catchment hydrology*, 861 pp. Elsevier, Amsterdam.

Kinzelbach, W., Bauer, P., Siegfried, T., & Brunner, P. (2003). Sustainable groundwater management-Problems and scientific tool. *Episodes-Newsmagazine of the International Union of Geological Sciences*, 26(4), 279-284.

Kresik, N., Mikszewski, A. (2013). Hydrogeological conceptual site models: data analysis and visualization. CRC Press, Boca Raton

Kubicz, J., Kajewski, I., Kajewska-Szkudlarek, J., & Dąbek, P. B. (2019). Groundwater recharge assessment in dry years. *Environmental Earth Sciences*, 78(18), 555.

Langmuir, D. (1997) – Aqueous Environmental Geochemistry. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 600 p.

Lei n.º 58/2005, 29 de dezembro, na versão atual (alterações da lei n.º 44/2017 de 19 de junho), Lei da Água.

- Lepierre, C. (1900). Estudo químico e bacteriológico das águas de Guimarães, Coimbra, Imprensa Académica.
- Leyshon, A. J., & Jame, Y. W. (1993). Boron toxicity and irrigation management. In: Gupta, U.C. (Ed.), *Boron and its Role in Crop Production*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 207– 226
- Lima, A. (2011). Modelo conceptual da ocorrência hidromineral do Gerês: fundamentos sobre a delimitação da área de recarga do sistema hidrotermal.
- Lima, A. (2010). Composição e Origem das Águas Minerais Naturais - Exemplo de Caldas da Saúde. Ed. Almedina, 246 p.
- Lima, A. (2001). “Hidrogeologia de Terrenos Graníticos (Minho – Portugal)”. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho. Braga. 451 pp.
- Lotze, F. (1945). Zur Gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta. *Geotek. Forsch*, 6, pp 78 – 92. (Tradução espanhola de 1950, in *Publicaciones extranjeras sobre geología de España*, V, 147-166.
- Loureiro, I.; Sepúlveda, D; Cunha, A.; Teixeira, A.; Alves, C.; Fontes, F.; Batista, I.; Carvalho, J.; Fernandes, J.; Nobre, J.; Pizarro, M.; Oliveira, M.; Prego, M. M.; Fernandes, M.; Frazão, M.; Ferreira, P.; Silva, P. L.; Machado, P.; Pinto, P; Machado, R.; Salgado, R.; Castro, R.; Gonçalves, S.; Monteiro, S.; Ribeiro, C.; Silva, L.; Meireles, F., Soraes, D.; Bragança, S.; Silva, A. C.; Pinto, D; Carvalho, J.; Vilarinho, C; Silva, B.; Vlae, T. (2019). Plano de Ação 2020-2021. Câmara Municipal de Guimarães.
- Maas, E.V. (1986). Salt tolerance of plants. *Appl. Agric. Res.* 1, 12–26
- Marques, J. M., Matias, M. J., Basto, M. J., Carreira, P. M., Aires-Barros, L. A., and Goff, F. E. (2010). Hydrothermal alteration of Hercynian granites, its significance to the evolution of geothermal systems in granitic rocks: *Geothermics*, v. 39, no. 2, p. 152-160
- Mendes, J. F. G; Silva, L.; Ribeiro, P.; Cássio, F.; Sepúlveda, D. (2014). Master Plan para a promoção do Ave Capital Verde Europeia. Comunidade Intermunicipal do Ave.
- Matthess, G. (1982). *The properties of groundwater*. John Wiley & Sons, 406 pp.
- Mazor, E. (2004). *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*. 3^o Edition. Marcel Dekker, Inc. Nova Iorque.
- Meireles, F., Fernandes, J., Salgado, R., Silva, P., Soares, S. (2017). Paisagem Protegida Local da Montanha da Penha. Bases para o plano de ação. Guimarães: CMG
- Mendes, B. & Oliveira, J. F. S. (2004). *Qualidade da Água para Consumo Humano*. Edições Lidel. Lisboa. 640 pp.

Mendes, E.; Ferreira Gomes, L. M. & Condesso De Melo, M. T. (2008). Contributo para a caracterização hidrogeológica das águas subterrâneas do maciço granítico da Serra da Estrela. *Comunicações Geológicas*, 2008, t. 95, pp. 61-71

Meredith, K., Moriguti, T., Tomascak, P., Hollins, S., Nakamura, E. (2013). *Geochim. Cosmochim. Acta* 112, 20–31.

Mook, W. G. (2000). *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications, Volume I. IHP-V Technical Documents in Hydrology, N° 39.*

Mostafa, M. G., Uddin, S. H., & Haque, A. B. M. H. (2017). Assessment of hydro-geochemistry and groundwater quality of Rajshahi City in Bangladesh. *Applied Water Science*, 7, 4663-4671.

Neves, A.A; Costa, F.; Bento, A. (2007). Mãe- d' água Centenário dp abastecimento público de Guimarães. Vimágua, Empresa de Água e Saneamento de Guimarães e Vizela, E. I. M.

Oliveira, A. J. T. (2017). Magmatismo tardi-Varisco na região do Minho. Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território. Julho 2017. pp. 122(Tese de Mestrado)

Oliveira, M. (2011). Modificações do Uso do Solo – A Serra da Penha. Universidade do Minho, Instituto de Ciências Sociais, Secção de Geografia. Guimarães. (Tese de Mestrado)

Oliveira, A. C; Lima, A. S. (2007). Mineral waters of northwestern of the Iberian Peninsula: estimation of the mean altitude of recharge areas based on isotopic data. *Actas do “XXXV IAH Congress: Groundwaters and Ecosystems”*; Lisboa, 17-21 de Setembro de 2007, 8 p, publicação em CD-ROM.

Oliveira, M. (2001). Modificações do uso do solo na Serra da Penha. Relatório de investigação. Guimarães: Universidade do Minho. pp. 190

Organização Mundial da Saúde (2017). *Diretrizes para a Qualidade da Água Potável: Quarta Edição.* Genebra, Suíça.

Organização Mundial da Saúde (1998). *Supplement to 1993. Guidelines for Drinking Water Quality, second ed.* World Health Organization, Geneva.

Organização Mundial da Saúde (1993). *Guidelines for Drinking Water Quality, second ed.* World Health Organization, Geneva.

Organização Mundial da Saúde (1984) *Guidelines for Drinking Water Quality, Vol. 3. Drinking Water Quality Control in Small Community Supplies.* Geneva.

Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) (2014). *Mudança climática 2014: impactos, adaptação e vulnerabilidade. Parte A: Aspectos globais e setoriais. Contribuição do Grupo de Trabalho II (WG2) para o Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).*

- Palmucci, W., & Rusi, S. (2014). Boron-rich groundwater in Central Eastern Italy: a hydrogeochemical and statistical approach to define origin and distribution. *Environmental earth sciences*, 72(12), 5139-5157.
- Pereira, M. (1999). Hidrogeologia das Rochas Fracturadas da Terra Quente Transmontana. Departamento de Geologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 300 p. (Tese de Doutoramento).
- Pinto E. & Barroso P. (2005). Penha: Retrospectiva Iconográfica da Sacralização da Montanha. Edição de Autor, Guimarães, 261 p.
- Pinto, A. M. R. T. (2011). *Caracterização e Valorização do Património Geológico da Penha (Guimarães, Norte de Portugal)*. Universidade do Minho (Tese de Mestrado) pp: 215
- Plano de gestão de região hidrográfica (PGRH) (2016). Relatório de base. Ministério da Agricultura, Ambiente e Ordenamento de Território. <https://www.apambiente>
- Plano de gestão de região hidrográfica do Cávado, Ave e Leça (RH2) (PGRH2) (2016). Relatório de base. Ministério da Agricultura, Ambiente e Ordenamento de Território. <https://www.apambiente>
- Plano diretor Municipal (PDM) (2015). Câmara Municipal de Guimarães.
- Planos de gestão de região hidrográfica <https://apambiente.pt/agua/planos-de-gestao-de-regiao-hidrografica#>
- Pérez-Estaún A., Bea F., Bastida F., Marcos A., Martínez-Catalán J. R., Martínez Poyatos D., Arenas R., Díaz Garcia F., Azor A., Simancas J. F. & González Lodeiro F. (2004). Macizo Iberico. In: Vera J. A. (Eds.) *Geologia de España*. Sociedad Geológica de España; Instituto Geológico y Minero de España, 21-230.
- Poissant, L., Schmit, J., Béron, P., 1994. Trace inorganic elements in rainfall in the Montreal Island. *Atmos. Environ.* 28, 339–346.
- Puga, M. D. C. P. D. (2016). *Recursos hídricos do Vale Superior do Rio Terva (Boticas, norte de Portugal): percursos hidrogeoquímicos em meio cristalino*. Universidade do Minho. pp. 124. (Dissertação de Mestrado).
- Pulido Carrillo, J.L. (1978). *Hidrogeologia practica*. Urmo, S. A. De Ediciones, Bolbao, pp. 254-281.
- Ravenscroft, P., & McArthur, J. M. (2004). Mechanism of regional enrichment of groundwater by boron: the examples of Bangladesh and Michigan, USA. *Applied Geochemistry*, 19(9), 1413-1430.
- Reimann, C.; Caritat, P. (1998). *Chemical Elements in the Environment. Factsheets for the Geochemist an Environmental Scientist*. Ed. Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 398 p.

Ribeiro, A.; Munhá, J.; Dias, R.; Mateus, A.; Pereira, E.; Ribeiro, M.L.; Fonseca, P.; Araújo, A.; Oliveira, J.T.; Romão, J.; Chaminé, H.; Coke, C.; Pedro, J.C. (2007). Geodynamic Evolution of the SW Europe Variscides. *Tectonics*, 26, 24 pp.

Ripa, L. W. (1993). A half-century of community water fluoridation in the United States: review and commentary. *J. Public Health Dent*. 53, 17–44.

Rogers, W. J. (2003). *Encyclopedia of Water Science*. Copyright© 2003 by Marcel Dekker, Inc.

Rosen, M.R., Stillings, L.L., Kane, T., Campbell, K., Vitale, M., Spanjers, R. (2020). Li and Ca enrichment in the Bristol Dry Lake brine compared to brines from Cadiz and Danby Dry Lakes, Barstow-Bristol Trough, California, USA. *Minerals* 10, 284. [https://doi.org/ 10.3390/min10030284](https://doi.org/10.3390/min10030284).

Rozanski, K., Araguás-Araguás, L., and Gonfiantini, R. (1993). Isotopic patterns in modern global precipitation: Climate change in continental isotopic records, v. 78, p. 1-36.

Saha, S., Reza, A. S., & Roy, M. K. (2019). Hydrochemical evaluation of groundwater quality of the Tista floodplain, Rangpur, Bangladesh. *Applied Water Science*, 9(8), 1-12.

Shomar, B., Müller, G., Yahya, A., Askar, S., & Sansur, R. (2004). Fluorides in groundwater, soil and infused black tea and the occurrence of dental fluorosis among school children of the Gaza strip. *Journal of water and Health*, 2(1), 23-35.

Siegel, F. R. (2002). *Environmental geochemistry of potentially toxic metals*. Springer, Berlin, 218 pp.

Silva, A. C., Ribeiro, C., Sepúlveda, D., Fontes, F., Loureiro, I., Cristino, J., Silva, L., Oliveira, P., Bragança, S. & Vale, T. (2020). Guimarães mais verde no caminho da sustentabilidade.

Silva, D. & Gonçalves, E. (2019). *Geologia da Serra d'Arga à Foz do Âncora. Floradata-Biodiversidade, Ambiente e Recursos Naturais*.

Smith, M., Cross, K., Paden, M. and Laban, P. (eds.) (2016). *Spring – Managing groundwater sustainably*. IUCN, Gland, Switzerland.

Stober, I.; Bucher, K. (1999). Origin of salinity of deep groundwater in crystallin rocks. *Terra Nova*, 11, 181-185.

Struckmeier, W., Rubin, Y., & Jones, J. A. A. (2007). Água subterrânea-reservatório para um planeta com sede. *Comissão Nacional da UNESCO*.

Trenberth, K.E., Smith, L., Qian, T., Dai, A., & Fasullo, J. (2007). Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data. *Journal of Hydrometeorology*. 8(4): 758–769.

Todd, D. K. (1980) – *Groundwater hydrology*, New York, John Wiley & Sons, 535p

Vieira, A., Costa, F. D. S., & Corrêa, L. (2019). Valores geomorfológicos em áreas protegidas: o caso da Serra da Penha/Guimarães (Portugal).

Vengosh, A. (1998). The isotopic composition of anthropogenic boron and its potential impact on the environment. *Biological trace element research*, 66, 145-151.

Wempe, Y. (2022). Application of environmental isotope compositions on geothermal systems in the Cávado river watershed in NW-Portugal. University of Bremen. pp. 73. . (Master Thesis) (Não publicada)

Wilcox, L.V. (1948). The quality water for irrigation use. US Dept, Agric Bull, p 40

Webgrafia

www.penhaguimaraes.com- consultado em novembro de 2021

www.unesco.pt- consultado em novembro de 2021

Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (2022) - <https://www.aprh.pt/pt/comissoes/aguas-subterraneas> - consultado em março de 2022

Censos (2021) -

https://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpgid=censos21_main&xpid=CENSOS21&xlang=pt

Censos (2011). -https://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos2011_apresentacao

Diretiva Quadro da Água- <https://www.apambiente.pt/dqa/index.html>

Direção Geral do Território, 2019. Carta Administrativa Oficial de Portugal. Limites administrativos- <https://www.dgterritorio.gov.pt/>- consultado em dezembro de 2021

Laboratório da Paisagem (2022) - www.labpaisagem.pt/projetos/ - Consultado em junho de 2022

Laboratório da Paisagem (2022)- <https://www.labpaisagem.pt/acoes-de-formacao-do-plano-de-acao-da-biodiversidade/> - Consultado em junho de 2022

Laboratório da Paisagem (2018) - <https://www.labpaisagem.pt/estrutura-de-missao-guimaraes-2030-apresentada/>- Consultado em junho de 2022

SNIRH- <http://snirh.apambiente.pt>- consultado em maio de 2022

Plano de gestão de região hidrográfica (PGRH) (2016).- <https://www.apambiente.pt/dqa/planos-de-gest%C3%A3o-de-bacias-hidrogr%C3%A1ficas.html> – consultado em maio de 2022

9.Anexos

Anexo 1 - Tabela com os dados climatológicos da estação meteorológica da Penha, no período entre outubro de 2021 e junho de 2022.

Mês	Temperatura (°C)	Humidade (%)	Precipitação (mm)
outubro/21	15.43	76.86	0.03
novembro/21	9.69	77.78	0.00
dezembro/21	10.02	85.60	0.03
janeiro/22	8.954	67.746	0.006
fevereiro/22	10.037	73.305	0.008
março/22	9.714	79.857	0.028
abril/22	11.678	79.377	0.022
maio/22	16.852	69.890	0.006
junho/22	16.824	82.880	0.015

Anexo 2 – Tabela com os resultados de caudal (L/s) obtidos durante as campanhas de campo.

Mina	nov/dez 2021	jun/2022
1	0.42	0.47
2	0.02	0.04
3	0.05	0.09
4	0.13	0.22
5	0.30	0.43
6	0.04	0.08
7	0.11	0.15
8	0.02	0.04
9	0.07	0.13
11	0.03	0.04
12	0.26	0.31
13	0.20	0.18
14	0.16	0.15
15	0.04	0.02
16	0.05	0.07
17	0.06	0.10
18	0.19	0.31
19	0.39	0.63
20	0.47	0.46
21	0.69	0.86
22	0.14	0.06
25	0.15	0.20
26	0.10	0.09
27	0.10	0.10
28	0.04	0.09
29	0.14	0.01
30	-	0.25
31	0.25	-
32	0.05	0.06

33	0.11	0.06
34	0.03	0.05
35	0.10	0.19
36	0.04	0.02
40	-	0.08
41	0.05	-
43	0.29	0.31

- não determinado

Anexo 3 - Tabela com dados de campo obtidos entre novembro e dezembro de 2021.

Mina	Localização	Altitude	pH	Temperatura (°C)	Condutividade elétrica (µS/cm)	Total de Sólidos Dissolvidos (ppm)	Potencial Oxidação-Redução (mV)
1	41.43559, -8.26596	488	6.08	13.87	59	29	-37.9
2	41.42812, -8.27203	506	7.02	12.60	39	20	-184.4
3	41.42907, -8.27137	578	7.17	12.79	57	28	-176.7
4	41.42994, -8.27106	260	5.81	12.44	60	30	-161.8
5	41.4299, -8.27158	455	6.80	12.48	61	31	-174.1
6	41.42986 -8.27179	453	7.29	12.48	53	27	-175.3
7	41.42986, -8.27229	444	7.13	11.71	35	17	-173.2
8	41.4275, -8.27227	471	7.28	12.48	36	18	-180.0
9	41.4291, -8.27221	380	6.88	13.01	51	25	-174.8
10	41.42895, -8.27252	379	-	-	-	-	-
11	41.42878, -8.27268	442	7.13	13.02	47	21	-175.0
12	41.42867, -8.27284	446	6.96	12.51	40	20	-169.7
13	41.4322, -8.27465	401	5.95	12.76	31	15	-171.4
14	41.43201, -8.27473	398	5.80	13.32	47	23	-172.9
15	41.43248, -8.27495	399	6.76	13.06	40	20	-176.1
16	41.4341, -8.27261	338	6.26	10.14	44	21	-177.1
17	41.43383, -8.27305	344	6.49	11.58	90	45	-173.0
18	41.43414, -8.27324	331	6.38	13.30	76	38	-172.0
19	41.43416, -8.27337	330	6.24	12.47	69	35	-105.7
20	41.43509, -8.2759	347	6.12	13.59	51	25	-168.5
21	41.43523, -8.2775	392	7.06	12.75	91	45	-102.3
22	41.43035, -8.27742	335	6.43	12.66	50	25	-107.5
23	41.43017, -8.2773	330	-	-	-	-	-
24	41.42983, -8.27709	335	-	-	-	-	-

25	41.4306, -8.27648	333	7.03	13.47	48	24	-113.8
26	41.43087, -8.27752	335	6.60	12.46	54	27	-103.4
27	41.43089, -8.27739	333	6.60	12.67	53	27	-113.3
28	41.43115, -8.27631	333	7.31	13.01	67	34	-108.7
29	41.42745, -8.27782	338	7.15	12.45	43	22	-105.6
30	41.42741, -8.27779	339	7.21	12.54	47	24	-106.6
31	41.42719, -8.27678	338	6.96	13.06	44	22	-110.6
32	41.42267, -8.27506	363	6.47	11.66	43	21.5	-85.1
33	41.42252, -8.27509	363	6.72	12.47	41	21	-109.8
34	41.4229, -8.27449	408	6.70	10.69	41	20	-81.9
35	41.42395, -8.27231	470	6.94	13.54	54	27	-111.8
36	41.43585, -8.27821	363	6.10	13.79	72	36	-104.0
40	41.43942, -8.27515	345	-	-	-	-	-
41	41.4392, -8.27462	345	6.68	14.48	73	36	-89.8
42	41.43917, -8.27535	317	-	-	-	-	-
43	41.43737, -8.27648	347	6.16	13.51	119	59	-102.6

- não determinado

Anexo 4 - Tabela com dados de campo obtidos em junho de 2022.

Mina	Localização	Altitude (m)	pH	Temperatura (°C)	Condutividade elétrica (µS/cm)	Total de sólidos dissolvidos (ppm)	Potencial Oxidação-Redução (mV)
1	41.43559, -8.26596	488	6.44	13.8	61	31	-
2	41.42812, -8.27203	506	6.27	14.0	48	24	-
3	41.42907, -8.27137	578	6.23	14.1	64	32	-
4	41.42994, -8.27106	260	5.83	13.6	73	36	-
5	41.4299, -8.27158	455	6.9	13.6	69	34	-
6	41.42986 -8.27179	453	7.20	13.5	65	32	-
7	41.42986, -8.27229	444	6.29	13.7	66	33	-
8	41.4275, -8.27227	471	6.37	14.4	45	24	-
9	41.4291, -8.27221	380	6.25	16.4	101	50	-
10	41.42895, -8.27252	379	-	-	-	-	-
11	41.42878, -8.27268	442	6.33	14.5	63	32	-
12	41.42867, -8.27284	446	6.24	14.3	58	29	-
13	41.4322, -8.27465	401	5.49	15.5	59	30	-
14	41.43201, -8.27473	398	5.52	15.6	63	31	-
15	41.43248, -8.27495	399	6.04	15.1	52	26	-
16	41.4341, -8.27261	338	6.03	15.5	70	35	-
17	41.43383, -8.27305	344	6.02	15.3	98	49	-
18	41.43414, -8.27324	331	5.83	16.5	88	44	-
19	41.43416, -8.27337	330	5.98	15.9	95	48	-
20	41.43509, -8.2759	347	5.61	14.9	66	33	-
21	41.43523, -8.2775	392	5.94	16.5	79	40	-
22	41.43035, -8.27742	335	5.66	16.7	55	28	-
23	41.43017, -8.2773	330	-	-	-	-	-
24	41.42983, -8.27709	335	-	-	-	-	-

25	41.4306, -8.27648	333	5.11	14.9	54	27	-
26	41.43087, -8.27752	335	6.26	16.3	62	31	-
27	41.43089, -8.27739	333	5.67	15.2	61	30	-
28	41.43115, -8.27631	333	6.24	18.1	72	36	-
29	41.42745, -8.27782	338	5.70	16.3	49	25	-
30	41.42741, -8.27779	339	6.27	14.8	52	26	-
31	41.42719, -8.27678	338	5.60	14.2	56	28	-
32	41.42267, -8.27506	363	6.21	14.2	58	29	-
33	41.42252, -8.27509	363	5.04	14.2	89	44	-
34	41.4229, -8.27449	408	5.80	14.1	109	14	-
35	41.42395, -8.27231	470	6.04	13.9	66	33	-
36	41.43585, -8.27821	363	5.75	15.3	85	42	-
40	41.43942, -8.27515	345	6.56	16.6	94	47	-
41	41.4392, -8.27462	345	-	-	-	-	-
42	41.43917, -8.27535	317	-	-	-	-	-
43	41.43737, -8.27648	347	6.20	15.7	104	52	-

Anexo 5 - Tabelas com resultados das análises químicas nas amostras de água recolhidas em junho de 2022.

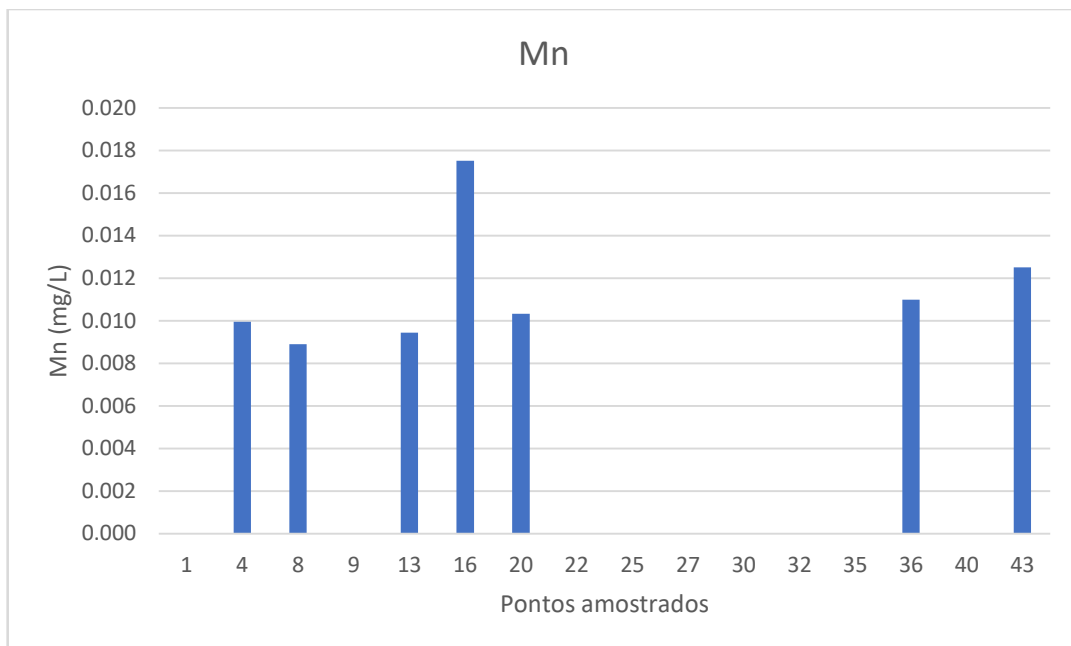
Mina de água	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	F (mg/L)
1	7.8	3.5	3.0	0.16
4	12.9	1.2	2.5	0.16
8	7.3	0.9	2.3	0.15
9	8.4	2.2	2.2	0.15
13	9.3	2.6	2.3	0.15
16	10.8	4.8	2.7	0.15
20	9.8	3.8	2.6	0.16
22	8.9	0.7	2.5	0.18
25	8.4	< LOD	2.2	0.16
27	10.1	< LOD	2.4	0.17
30	8.1	< LOD	2.3	0.17
32	7.4	0.7	2.4	0.17
35	6.9	1.0	2.2	0.19
36	11.4	4.4	3.9	0.16
40	9.5	5.8	2.8	0.16
43	10.2	12.6	4.0	0.18

<LOD- abaixo do limite de deteção.

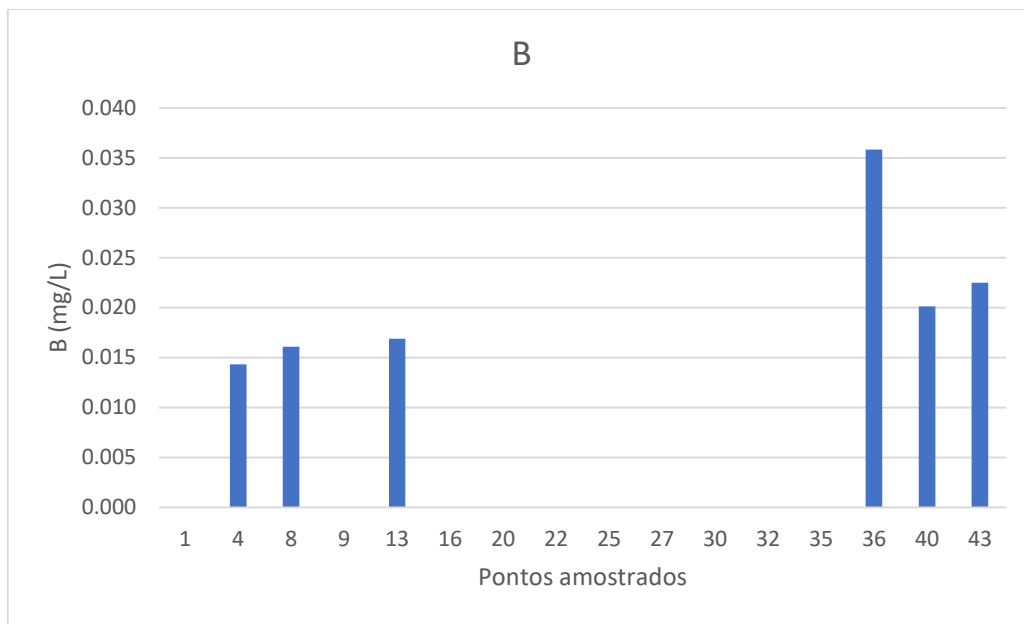
Mina de água	Na (mg/L)	Ca (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Si (mg/L)	Sr (mg/L)	As (mg/L)	B (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Li (mg/L)
1	6.3	2.1	0.6	1.0	6.3	0.020	< LOD	< LOD	0.004	< LOD	< LOD
4	8.2	1.9	0.8	0.9	4.3	0.017	< LOD	0.014	0.005	0.010	< LOD
8	5.4	1.0	0.8	0.6	6.2	0.010	< LOD	0.016	0.004	0.009	< LOD
9	7.3	1.6	0.5	0.9	5.9	0.014	< LOD	< LOD	0.005	< LOD	< LOD
13	7.3	1.6	0.4	0.7	6.9	0.014	< LOD	0.017	< LOD	0.009	< LOD
16	7.9	2.0	0.6	1.0	5.0	0.018	< LOD	< LOD	< LOD	0.018	< LOD
20	7.5	2.0	0.7	0.9	5.8	0.015	< LOD	< LOD	0.004	0.010	< LOD
22	7.0	1.1	0.3	0.6	7.2	0.010	< LOD	< LOD	0.005	< LOD	< LOD
25	7.3	1.0	0.3	0.6	6.6	0.011	< LOD	< LOD	0.007	< LOD	< LOD
27	7.7	1.1	0.3	0.6	8.7	0.011	< LOD	< LOD	0.004	< LOD	< LOD
30	6.2	1.2	0.3	0.6	6.7	0.011	< LOD	< LOD	0.004	< LOD	< LOD
32	6.0	1.1	0.3	0.7	6.3	0.010	< LOD	< LOD	0.001	< LOD	< LOD
35	6.0	1.9	0.5	0.7	8.0	0.015	< LOD	< LOD	0.003	< LOD	0.007
36	8.5	2.6	0.5	1.2	7.3	0.019	< LOD	0.036	0.011	0.011	0.008
40	7.8	1.8	0.4	0.9	6.5	0.016	< LOD	0.020	0.004	< LOD	0.009
43	10.0	3.7	1.2	1.6	9.2	0.030	< LOD	0.023	0.003	0.013	0.009

LOD - limite de deteção.

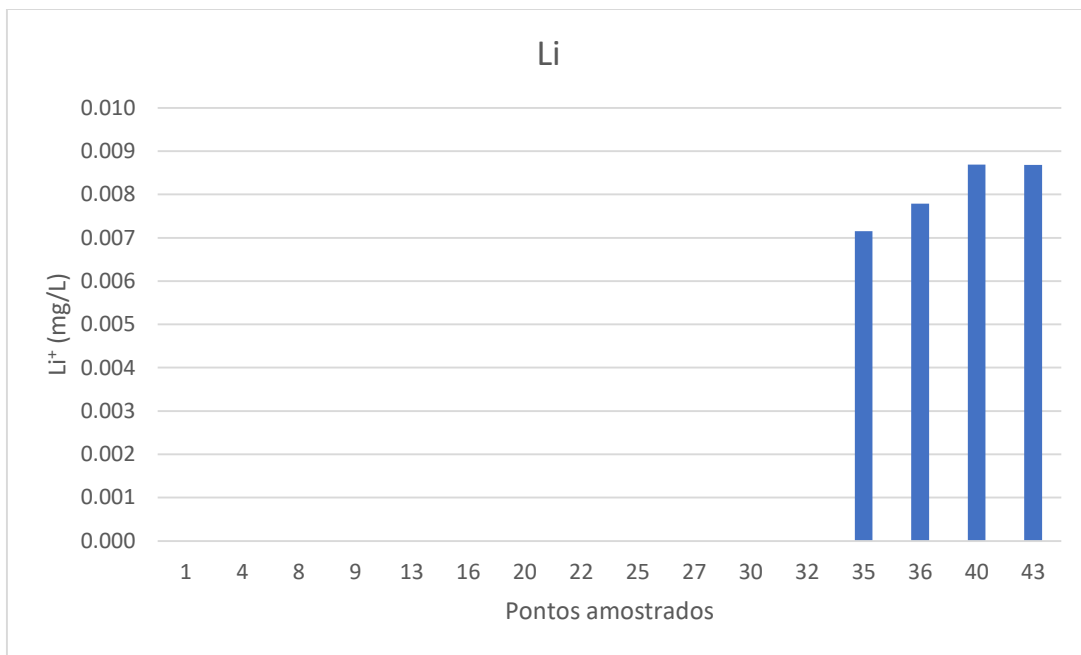
Anexo 6 - Variação da quantidade de manganês (mg/L) nos pontos de água amostrados.



Anexo 7- Variação da quantidade de boro (mg/L) nos pontos de água amostrados.



Anexo 8- Variação da quantidade de lítio (mg/L) nos pontos de água amostrados.



Anexo 9- Tabela com valores paramétricos segundo o Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de agosto e segundo as normas internacionais da OMS.

Parâmetros físico- químicos	Valor Paramétrico (de acordo com o Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de agosto)	Normas Internacionais da OMS (2017)	
		Limite desejável	Limite máximo permitido
Cálcio	≤100 mg/L	75	200
Cloretos	250 mg/L	200	600
Condutividade Elétrica	2 500 µS/cm	-	-
pH	≥ 6,5 e ≤ 9	6,5	8,5
Sulfatos	250 mg/L	200	400
TDS	-	500	1 500
ORP	-	-	-
Fluoretos	1,5 mg/L	1	1,5
Magnésio	≤50 mg/L	50	150
Nitratos	50 mg/L	-	50
Potássio	12 mg/L	-	12
Sódio	200 mg/L	-	200

*- não abrangido pela legislação

Anexo 10- Tabela com as composições isotópicas de deutério e oxigênio-18 da água subterrânea da Montanha da Penha obtidas na campanha de junho de 2022

Mina	Altitude (m)	$\delta \text{:H}$	$\delta \text{:}^{18}\text{O}$
1	504	-28.9	-5.29
4	530	-27.9	-5.13
8	517	-28.7	-5.36
9	507	-28.1	-5.28
13	455	-28.6	-5.34
16	459	-27.8	-5.25
20	412	-27.6	-5.18
22	391	-27.4	-5.12
25	407	-27.9	-5.21
27	393	-27.6	-5.14
30	404	-28.3	-5.28
32	453	-28.0	-5.24
35	525	-28.7	-5.34
36	365	-27.7	-5.19
40	427	-28.0	-5.14
43	345	-28.7	-5.24