

# **ELABORACÇÃO DE PERÍMETROS DE PROTECCÃO DE CAPTAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, COM RECURSO AOS SIG**

VANESSA ALEXANDRA SANTOS ALVANÉ GONÇALVES

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA**  
(2º ciclo de estudos)

*(A presente dissertação não segue o novo Acordo Ortográfico, por decisão da autora).*

Orientador: Professor Doutor Victor Manuel Pissarra Cavaleiro

Setembro de 2020



*Tu, nas tripas, tens mazelas?  
Vai às termas de Caldelas.  
Tens digestões demoradas?  
Frequenta as Pedras Salgadas.  
Se nos rins tens avaria.  
Vai às termas de Curia.  
Dói-te o fígado, talvez?  
Não deixes de ir ao Gerês.  
Nos intestinos tens mal?  
Visita Monte Real.  
No estômago tens estrago?  
Aconselho-te Vidago.  
Faz-te a bronquite arrepios?  
Deves ir para Entre-os-Rios.  
De sífilis tens mazela?  
Toma banho em Vizela.  
Tens diabetes, cansaço?  
Vai-te curar a Melgaço.  
Os gostosos não malucos.  
Curam-se todos nos Cucos.  
As águas de Portugal  
No mundo não têm rival.  
O português basofeiro  
É que vai para o estrangeiro...*

(Recolhida no FB, com a seguinte referência: “Gentilmente enviado pelo Sr. ° João Francisco Lopes – Lisboa”).



## **AGRADECIMENTOS**

Todos nós, nesta fase, passámos momentos de solidão, incerteza, mas foram momentos marcados por muita motivação e dedicação. São estes momentos que mostram quem realmente merece um lugar de destaque, que nos ajudam a não desistir e a manter uma atitude mais positiva.

Vou começar por agradecer aos meus Pais, porque são os meus pais e porque foram a grande motivação para regressar à Universidade. Foram e continuarão a ser sempre o meu apoio. Agradeço à minha Família, o orgulho que têm por mim, porque o sentimento é recíproco. Aos meus Amigos, aos meus cúmplices, pela constante partilha de experiências e sonhos. Aos Docentes do Departamento de Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Instituto Superior de Engenharia do Porto, que me transmitiram o conhecimento científico que me permitiu concluir também esta dissertação.

Aos Docentes de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica da Universidade da Beira Interior e respectivo Departamento, por me apresentarem temas desafiantes e acima de tudo, por mostrarem a utilidade de um SIG em situações reais de enorme importância na sociedade.

Um muito obrigado ao meu Orientador, Professor Doutor Victor Manuel Pissarra Cavaleiro, que sempre me motivou, acompanhou e mais importante, apoiou, perante todas as adversidades. Agradeço profundamente essa compreensão e dedicação, para que esta dissertação, fosse entregue.

À Fundação INATEL em especial, à Directora Dr.<sup>a</sup> Carmo Soares e Colaboradores, por permitirem a visita às Instalações.

À ESRI, pela licença, que me permitiu descobrir as potencialidades do ArcGIS.



## **RESUMO**

O aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos em Portugal e outros países, tem vindo a crescer e a sua tendência é que continue a crescer nos próximos anos. Este desenvolvimento acompanha não só o crescimento demográfico, mas também a expansão económica.

A riqueza das águas minerais e de nascente em Portugal, exhibe um elevado valor patrimonial e ecológico. O incontestável valor acrescentado que possuem, permitiu que desde 1928, a legislação portuguesa estabeleça perímetros de protecção às captações. A delimitação desses perímetros, integra uma ferramenta de gestão do recurso, tendo em vista a sua preservação quantitativa, qualitativa e ecológica.

O estudo da vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos é fundamental, uma vez que permite analisar quais os factores que poderão comprometer a qualidade da água e os riscos pelos quais pode ser poluída. Possibilita ainda uma actuação competente ao nível da gestão do aquífero, auxiliando na tomada de políticas de controlo e protecção, assegurando sempre o uso sustentável do recurso.

Os mapas de vulnerabilidade, serão calculados com recurso aos SIG, que para Mejuto et al. (1999), são instrumentos de extrema importância no estudo do risco de contaminação das águas subterrâneas, encontrando-se em constante ascensão. Recorreu-se aos SIG, uma vez que permitem a recolha de dados espaciais e ao mesmo tempo a realização de processamento de dados como a georreferenciação, integração, agregação e análise espacial. Com o presente trabalho, onde se irá aplicar o método DRASTIC, pretende-se que este estudo permita o auxílio na tomada de decisão ao nível do planeamento e gestão das águas subterrâneas, de modo a garantir a protecção e gestão sustentável.

Por último, a presente dissertação pretendeu encontrar respostas para um problema que se vem colocando nos últimos anos relativamente à validação do perímetro de protecção da captação de águas subterrâneas do Centro de férias do INATEL – Quinta da Torre, em Entre-os-Rios (Furo de Barbeitos) e sobre a eventual contaminação das águas.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Água subterrânea; Sistemas de Informação Geográfica; vulnerabilidade à poluição; perímetros de protecção; DRASTIC.



## **ABSTRACT**

The use of underground water resources in Portugal and other countries has been increasing and its trend is to continue to raise in the following years. This growth is directly related with demographic growth and economic expansion.

The richness of mineral and spring waters in Portugal, represents a high patrimonial and ecological value. Due to its value, the Portuguese legislation as established perimeters of protection of the captations since 1928. The resource management intend quantitative, qualitative, and ecological preservation.

The study of the underground water resources vulnerability is essential, since it allows the recognition of factors that may compromise water quality and the risks of being polluted. This, also enables competent action in terms of underground water management, helping in the creation of control and protection policies that ensure the sustainable use of the resource.

The vulnerability maps will be calculated using the GIS, which according to Mejuto et al. (1999), are extremely important instruments in the study of the risk of contamination of groundwater and are constantly rising. GIS was used, since it allows the gathering of spatial data and at the same time gives permission to process different data such as georeferencing, integration, combination, and spatial analysis.

With the present work, where the DRASTIC method will be applied, it is intended that this study assists in decision-making of planning and management of groundwater, to guarantee its protection and sustainability.

The main goal of this dissertation is to find answers to a problem that has been argued for several years, which is related with the validation of the groundwater protection perimeter of the INATEL - Quinta da Torre, in Entre-os-Rios (Barbeitos Borehole) and the possible water contamination.

## **KEYWORDS**

Groundwater; Geographic Information Systems; vulnerability to pollution; protection perimeters; DRASTIC.



# ÍNDICE

Capítulo I .....	1
1. Introdução .....	1
1.1. Considerações iniciais .....	1
1.2. Enquadramento do tema e objectivos.....	3
1.3. Metodologias e estrutura da dissertação .....	6
2. Enquadramento Legal .....	7
2.1. Disposições gerais .....	7
2.2. Quadro Institucional.....	7
2.3. Objectivos para as águas subterrâneas .....	8
2.4. Caracterização das águas subterrâneas .....	8
2.5. Pressões e impactes nas águas subterrâneas .....	9
2.6. Protecção das águas subterrâneas .....	9
Capítulo II.....	13
3. Hidrogeologia: conceitos gerais .....	13
3.1. Origem, distribuição e circulação da água subterrânea .....	13
3.2. Balanço Hidrológico .....	15
3.3. Propriedades das formações geológicas .....	15
3.4. Áreas de reabastecimento do aquífero .....	19
3.5. Parâmetros Hidrogeológicos .....	20
3.5.1. Função Capacitiva .....	20
3.5.2. Função Transmissiva .....	23
4. Hidrogeoquímica das águas minerais .....	25
4.1. Considerações iniciais .....	25
4.2. Parâmetros organolépticos e físico-químicos.....	25
4.3. Diagramas hidrogeoquímicos.....	27
4.4. Tipos hidrogeoquímicos .....	28
4.5. Projecto Hidrogenoma.....	31
4.5.1. Factores-chave .....	31
4.5.2. Objectivos .....	31
4.5.3. Perspectivas futuras.....	32
Capítulo III .....	33
5. Métodos de avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos à poluição.....	33
5.1. Tipos de poluição de acordo com a sua origem e ocupação do solo .....	33
5.2. Vulnerabilidade e risco de contaminação das águas subterrâneas .....	34
5.3. Metodologias de avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas.....	36
5.3.1. Método DRASTIC.....	38
5.3.1.1. Caracterização dos parâmetros .....	40
5.3.1.1.1. Parâmetro D - Profundidade do topo do aquífero.....	40
5.3.1.1.2. Parâmetro R - Recarga do aquífero.....	41
5.3.1.1.3. Parâmetro A – Tipologia do material do aquífero .....	41
5.3.1.1.4. Parâmetro S - Tipo de solo .....	41
5.3.1.1.5. Parâmetro T – Topografia .....	42
5.3.1.1.6. Parâmetro I – Impacto da zona não saturada/vadosa. 42	
5.3.1.1.7. Parâmetro C – Conductividade hidráulica do aquífero 43	
5.3.2. Capacidade depurativa do solo .....	43
5.3.3. Potencial de escoamento dos solos .....	43
5.3.4. Declive .....	44
5.3.5. Quantidade máxima de água armazenável no solo .....	44
6. Critérios e metodologia na delimitação de perímetros de protecção em captações de águas subterrâneas .....	44

6.1. Critérios de delimitação de perímetros de protecção .....	44
6.1.1. Selecção do critério a aplicar .....	45
6.2. Metodologia na delimitação de perímetros de protecção.....	46
6.2.1. Métodos geométricos .....	47
6.2.1.1. Método do raio fixo arbitrário .....	47
6.2.2. Métodos analíticos e numéricos simplificados.....	47
6.2.2.1. Método baseado na Lei de Darcy.....	47
6.2.2.2. Método do raio fixo calculado.....	48
6.2.2.3. Método de krijgsman e Lobo-Ferreira .....	50
6.2.3. Métodos gráficos.....	51
6.2.4. Métodos numéricos .....	51
6.2.5. Outros métodos .....	52
6.3. Selecção do método a aplicar.....	52
Capítulo IV.....	55
7. Caso de estudo: recurso hidromineral de Entre-os-Rios .....	55
7.1. Informação consultada.....	55
7.2. Considerações iniciais.....	56
7.3. Caracterização geomorfológica, tectónica e geológica.....	60
7.4. Caracterização hidrológica, hidrogeológica e hidroquímica .....	64
7.4.1. Reservatório, características hidroquímicas e hidrodinâmicas .....	65
7.4.2. Modelo hidrológico conceptual .....	74
7.5. Metodologia – Sistemas de Informação Geográfica .....	74
7.5.1. Generalidades.....	74
7.5.2. Detecção remota e foto-interpretacção da área de Entre-os-Rios .....	75
7.5.3. Análise espacial e modelação geográfica .....	80
7.5.3.1. MDT – Modelo Digital de Terreno .....	80
7.5.3.2. Métodos de interpolação espacial .....	82
7.5.3.3. Modelos de localizaçao .....	82
7.5.4. Os SIG na gestão de águas subterrâneas – Metodologia DRASTIC .....	82
7.5.4.1. Considerações iniciais .....	83
7.5.4.2. Parâmetro D – Profundidade do topo do aquífero .....	84
7.5.4.3. Parâmetro R – Recarga do aquífero.....	84
7.5.4.4. Parâmetro A – Tipologia do material do aquífero .....	87
7.5.4.5. Parâmetro S – Tipo de solo.....	88
7.5.4.6. Parâmetro T – Topografia.....	92
7.5.4.7. Parâmetro I – Impacto da zona não saturada/vadosa.....	94
7.5.4.8. Parâmetro C – Conductividade hidráulica do aquífero .....	95
7.6. Resultados.....	95
7.7. Conclusões.....	100
7.8. Principais limitações evidenciadas e perspectivas futuras.....	102

APENDICE I: Combinação RGB - *Color Infrared Vegetation*

APENDICE II: Combinação RGB - *Geology*

APENDICE III: Combinação RGB - *False Color Urban*

APENDICE IV: Combinação RGB - *Agriculture*

APENDICE V: Combinação RGB - *NDVI*

APENDICE VI: Combinação RGB - *NDMI*

APENDICE VII: Combinação RGB - *NDWI*

APENDICE VIII: Combinação RGB - *Shortwave Infrared-1*

APENDICE IX: Combinação RGB - *Shortwave Infrared-2*

ANEXO I: Decreto-Lei N.º 382/99 de 22 de Setembro

ANEXO II: Portaria N.º 203/2003 de 7 de Março



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização das águas minerais naturais em Portugal Continental.....	5
Figura 2 – Representação esquemática das diferentes zonas de protecção de uma captação de água subterrânea .....	10
Figura 3 – Distribuição da água na Terra .....	13
Figura 4 – Representação dos principais componentes do ciclo hidrológico.....	14
Figura 5 – Esquerda: efeito da bombagem de furos a captar em aquífero livre; Direita: efeito da bombagem de furos a captar em aquífero confinado .....	16
Figura 6 - Classificação dos aquíferos quanto à sua estrutura.....	17
Figura 7 - Tipos de aquíferos consoante as condições hidráulicas e estruturais .....	19
Figura 8 - Fases constituintes de um meio geológico .....	21
Figura 9 - Representação esquemática da Lei de Darcy .....	23
Figura 10 – Esquerda: Diagrama de Piper com indicação das fácies hidrogeoquímicas; Direita: Exemplo de Diagrama de Piper com a tipologia da água do furo Barbeitos (AC2) de Entre-os-Rios.....	28
Figura 11 – Esquerda: Diagrama de Stiff; Direita: Exemplo de um Diagrama de Stiff, sendo em vermelho a água mineral e em azul a água normal da zona de Entre-os-Rios.....	28
Figura 12 - Distribuição e quimismo das águas minerais em Portugal Continental.....	30
Figura 13 - Processos mais comuns envolvidos na contaminação de águas subterrâneas .	33
Figura 14 - Mapeamento da vulnerabilidade "clássica" à poluição das águas subterrâneas de Portugal Continental .....	36
Figura 15 - Mapeamento da vulnerabilidade à poluição desenvolvido para Portugal Continental pelo método DRASTIC, à escala 1:500000 .....	38
Figura 16 - Representação esquemática dos parâmetros incorporados no método DRASTIC .....	39
Figura 17 - Definição de perímetro de protecção utilizando o método do raio fixo calculado .....	48
Figura 18 - Esquerda: Entrada do Balneário Termal de Entre-os-Rios; Direita: Espaço verde das Termas de Entre-os-Rios. ....	56
Figura 19 - Mapa do enquadramento Hidrogeológico do Furo de Barbeitos do Centro de Férias do INATEL, situado no Maciço Antigo, na Bacia do Douro, no Distrito do Porto, Concelho de Penafiel e Freguesia de Eja .....	58
Figura 20 - Mapa do Enquadramento Geográfico do Furo de Barbeitos; Polígono ABCD (Zona intermédia do perímetro de protecção); Polígono EFGH (Zona alargada do perímetro de protecção) da Concessão Hidromineral HM-23 de Entre-os-Rios (Quinta da Torre) ...	59
Figura 21 - Esquerda: Modelo Digital de Terreno do local de estudo, recorrendo à ferramenta ArcScene; Direita: Perfil Topográfico do local de estudo entre o Furo de Barbeitos e a bomba Repsol com orientação W-E .....	60
Figura 22 - Localização da Captação de Entre-os-Rios, no contexto geológico e tectónico (adaptada da Carta Geológica de Portugal à escala 1:1.000.000. ....	62
Figura 23 - Extracto da Carta Geológica Folha 13–B Castelo de Paiva à escala 1/50.000..	62
Figura 24 - Mapa do esboço geológico regional da área envolvente ao Furo de Barbeitos.	63
Figura 25 - Esquerda: Furo Barbeitos: perfil geológico esquemático; Direita: Perfis geológicos da área de Entre-os-Rios com a localização da Mina (ou Nascente) da Curveira, Furo Barbeitos e Nascente das Ardias; sobre-elevação vertical: 3 vezes escala horizontal	64
Figura 26 - Mapa do Enquadramento Hidroclimatológico da Bacia Hidrográfica do Douro, onde se insere a área de estudo. ....	66
Figura 27 - Mapa do Enquadramento Hidroclimatológico de pormenor da Bacia Hidrográfica do Douro, onde se insere a área de estudo .....	67
Figura 28 - Balanço hidrológico sequencial mensal relativo à estação climatológica de Luzim .....	68
Figura 29 - Esquerda: aspectos da caseta de protecção do Furo de Barbeitos; Direita: Interior da caseta e boca do Furo de Barbeitos. ....	70

Figura 30 - Mapa do Inventário dos Pontos de Água inseridos na área de estudo.....	72
Figura 31 - Mapa da Interpolação de Parâmetros - Conductividade Eléctrica, pH, Temperatura, Superfície Nível Piezométrico .....	73
Figura 32 - Modelo Hidrogeológico conceptual da área de Entre-os-Rios. ....	74
Figura 33 - Esquerda: Color Infrared Vegetation - RGB (B8, B4, B3) da região Entre-os-Rios; Direita: Geology – RGB (B12, B11, B2) da região Entre-os-Rios .....	76
Figura 34 - Esquerda: False Color – URBAN – RGB (B12, B11, B4) da região Entre-os-Rios; Direita: Agriculture - RGB (B12, B11, B4) da região Entre-os-Rios .....	77
Figura 35 - Esquerda: Normalized Difference Vegetation Index - NDVI da região Entre-os-Rios; Direita: Normalized Difference Moisture Index – NDMI da região Entre-os-Rios ..	77
Figura 36 - Normalized Difference Water Index - NDWI da região Entre-os-Rios.....	78
Figura 37 - Esquerda: Short Wave InfraRed-1 - RGB (B12, B8A, B4) da região Entre-os-Rios; Direita: Short Wave InfraRed-2 - RGB (B12, B11, B2) da região Entre-os-Rios.....	78
Figura 38 - Mapa das diferentes Combinações RGB do enquadramento do local de estudo .....	79
Figura 39 – Modelo Digital de Terreno da área envolvente ao Furo de Barbeitos .....	81
Figura 40 - Esquema da obtenção do Mapa de Vulnerabilidade à poluição do aquífero, por meio dos 7 parâmetros DRASTIC que determinam o transporte de poluentes num ambiente SIG.....	83
Figura 41 - Carta do Parâmetro D - Profundidade do Topo do Aquífero .....	84
Figura 42 - Mapa Flow Direction, Perfil de Curvatura, Carta de Declives e Áreas de Potencial de Infiltração .....	86
Figura 43 - Carta do Parâmetro R – Recarga do Aquífero .....	87
Figura 44 - Carta do Parâmetro A – Tipologia do Material do Aquífero .....	88
Figura 45 - Carta de Uso e Ocupação do Solo do local de estudo .....	90
Figura 46 - Mapa do Tipo de Solo, Profundidade média das raízes das Plantas, Carta do Tipo de Uso e Ocupação do Solo da Área de estudo .....	91
Figura 47 – Carta do Parâmetro S – Tipo de Solo.....	92
Figura 48 - Mapa do Modelo Digital de Terreno e Carta de Declives da área envolvente ao Furo de Barbeitos .....	93
Figura 49 - Carta do Parâmetro T – Topografia.....	94
Figura 50 - Carta do Parâmetro I – Impacto da Zona não Saturada/vadosa .....	94
Figura 51 - Carta do Parâmetro C – Conductividade Hidráulica do Aquífero .....	95
Figura 52 - Mapa da Vulnerabilidade à Poluição do Aquífero de Entre-os-Rios, com identificação de Zonas com maior susceptibilidade.....	96
Figura 53 - Mapa das considerações finais das Zonas de Protecção do Aquífero de Entre-os-Rios.....	99



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros hidrogeológicos e Hidrodinâmicos.....	20
Tabela 2 - Valores de Porosidade efectiva (%) para diversos tipos de rocha .....	21
Tabela 3 – Valores da Porosidade e Porosidade efectiva para alguns tipos de Rochas .....	22
Tabela 4 - Classificação das captações segundo o caudal médio.....	24
Tabela 5 - Valores representativos de conductividade hidráulica para diversos tipos de rocha .....	24
Tabela 6 - Tipo de sabor da água consoante os componentes químicos.....	25
Tabela 7 - Tipo de água consoante a sua temperatura .....	26
Tabela 8 - Tipo de água consoante a sua dureza .....	26
Tabela 9 - Tipo de água consoante o total de resíduo seco ou mineralização total.....	26
Tabela 10 - Tipo de água consoante o teor do anião dominante .....	26
Tabela 11 - Tipo de água consoante o teor do catião dominante.....	27
Tabela 12 - Classificação da mineralização e da qualidade das águas com base na conductividade eléctrica.....	27
Tabela 13 - Principais métodos para determinação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas.....	37
Tabela 14 - Peso de cada parâmetro de vulnerabilidade DRASTIC .....	40
Tabela 15 - Valor do índice e as classes de vulnerabilidade DRASTIC.....	40
Tabela 16 - Classes e índices da profundidade da zona não saturada.....	40
Tabela 17 - Classes e índices de recarga do aquífero .....	41
Tabela 18 - Classes e índices do material do aquífero .....	41
Tabela 19 - Classes e índices do tipo de solo .....	42
Tabela 20 - Classes e índices da topografia.....	42
Tabela 21 - Classes e índices da influência da zona não saturada.....	42
Tabela 22 - Classes e índices de conductividade hidráulica.....	43
Tabela 23 - Poder depurador das rochas carbonatadas e fissuradas.....	43
Tabela 24 - Classificação dos Grupos Hidrológicos dos Solos, características e capacidade de infiltração correspondentes .....	44
Tabela 25 - Relação entre critérios no traçado de perímetros de protecção e seus objectivos .....	46
Tabela 26 - Valorização dos critérios utilizados na delimitação dos perímetros de protecção em função de considerações técnicas .....	46
Tabela 27 - Zonas de protecção para os vários tipos de aquífero.....	49
Tabela 28 - Critério empregue nos diferentes métodos de delimitação de perímetros de protecção .....	53
Tabela 29 - Selecção do método com base em considerações técnicas.....	54
Tabela 30 - Dados necessários a aplicar nos diferentes métodos na elaboração de perímetros de protecção.....	54
Tabela 31 - Resumo das Unidades Hidrogeológicas do local de estudo.....	65
Tabela 32 - Resumo dos Parâmetros hidrogeológicos .....	66
Tabela 33 - Enquadramento dos elementos climáticos do local de estudo.....	66
Tabela 34 - Caracterização hidrogeoquímica da água mineral do Furo de Barbeitos para os anos de 1990 a 2012 e 2018.....	69
Tabela 35 - Características gerais dos pontos de água inventariados .....	71
Tabela 36 - Diferentes bandas do Sentinel-2, comprimentos de onda e resolução espacial específica .....	76
Tabela 38 – Tipo de Uso e Ocupação do Solo do local de estudo (de acordo com as especificações técnicas da carta de uso e ocupação do Solo (COS) de Portugal continental. ....	90
Tabela 39 - Resumo dos valores atribuídos a cada parâmetro do índice DRASTIC do local de estudo.....	96

## LISTA DE EQUAÇÕES

1)	Balanço Hidrogeológico .....	15
2)	Balanço Hidrogeológico Simplificado (I) .....	15
3)	Balanço Hidrogeológico Simplificado (II).....	15
4)	Porosidade .....	21
5)	Porosidade efectiva.....	21
6)	Porosidade total.....	21
7)	Coefficiente de armazenamento .....	22
8)	Lei de Darcy.....	23
9)	Velocidade de escoamento/média.....	23
10)	Velocidade efectiva .....	24
11)	Transmissividade.....	24
12)	Vulnerabilidade à poluição – Método DRASTIC .....	39
13)	Índice de depuração na zona não saturada .....	43
14)	Velocidade linear de escoamento .....	47
15)	Tempo de propagação .....	47
16)	Distância da captação ao limite a proteger, ao tempo de propagação considerado necessário .....	47
17)	Raio do perímetro de protecção – Método do raio fixo calculado .....	48
18)	Equação de Theis.....	49
19)	Equação de Theis - Equação auxiliar relacionada com a função do poço.....	49
20)	Equação de Theis - Função do poço .....	49
21)	Distância de protecção a montante da captação – Método de Krijgsman e Lobo-Ferreira .....	50
22)	Distância de protecção a montante da captação – Método de Krijgsman e Lobo-Ferreira - Equação auxiliar (I).....	50
23)	Distância de protecção a montante da captação – Método de Krijgsman e Lobo-Ferreira - Equação auxiliar (II) .....	50
24)	Distância de protecção a jusante da captação – Método de Krijgsman e Lobo-Ferreira.....	50
25)	Distância de protecção na perpendicular à direcção do fluxo – Método de Krijgsman e Lobo-Ferreira .....	50



## LISTA DE ACRÓNIMOS

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
APIAM	Associação Portuguesa dos Industriais de Águas Minerais Naturais e de Nascente
ARH	Administrações de região Hidrográfica
CIGeoE	Base de dados do Centro de Informação Geoespacial do Exército
COS	Carta de Uso e Ocupação do Solo
DGADR	Direcção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural
DGEG	Direcção Geral de Energia e Geologia
DGT	Direcção Geral do Território
DRASTIC	<i>Depth (D), Recharge (R), Aquífer (A), Soil (S), Topography (T), Impact (I), Hydraulic Conductivity (C)</i>
EA	<i>Environment Agency</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EEA	<i>European Environment Agency</i>
ERSAR	Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos
ESA	<i>European Space Agency</i>
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
ETP	Evapotranspiração Potencial
ETR	Evapotranspiração Real
IDW	<i>Inverse Distance Weighted</i>
IGM	Instituto Geológico e Mineiro
IGP	Instituto Geográfico Português
INAG	Instituto Nacional da Água
INATEL	Instituto Nacional para Aproveitamento dos Tempos Livres dos Trabalhadores
INE	Instituto Nacional de Estatística
INETI	Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
ITGE	<i>Instituto Tecnológico GeoMinero de España</i>
LABCARGA	Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada
LAIST	Laboratório de Análises do Instituto Superior Técnico de Lisboa
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
MDT	<i>Model Digital Terrain</i>
MSI	<i>MultiSpectral Instrument</i>
NDMI	<i>Normalized Difference Moisture Index</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i>
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SNIAmb	Sistema Nacional de Informação de Ambiente
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
SROA	Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário
SWIR	<i>Short wave Infrared</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>
UBI	Universidade da Beira Interior
USSG	<i>United States Geological Survey</i>



# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente trabalho consiste na dissertação de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica, apresentada à Faculdade da Beira Interior, na qual se analisa e valida um perímetro de protecção de águas subterrâneas com recurso aos SIG.

A pertinência de um trabalho dedicado ao estudo das águas subterrâneas, no que diz respeito aos seus perímetros de protecção, infere que a sua instituição é uma ferramenta de prevenção, que visa maximizar a protecção deste recurso. Não é um processo tão simples como se proibir ou restringir o uso do território, uma vez que poderá afectar a actividade económica das populações. Segundo Cruz (1997), os perímetros de protecção devem corresponder à área necessária e suficiente para a protecção de um aquífero e dos meios de exploração. As zonas de protecção (imediata, intermédia e alargada), não devem ter dimensões tão pequenas que percam a eficácia, nem exageradamente grandes. A exagerada amálgama de servidões administrativas tem consequências desastrosas no desenvolvimento e conseqüentemente na economia. É imprescindível conseguir-se encontrar um equilíbrio balanceado, por um lado, os benefícios ou lucros das captações em relação aos ganhos ou eventuais riscos de utilização do terreno. O conhecimento sobre a dinâmica e funcionamento do escoamento hidráulico subterrâneo, servirá de fiel a esta balança. No entanto, o equilíbrio adequado nas dimensões dos perímetros de protecção será tanto maior quanto mais completo for o conhecimento científico sobre o local em estudo.

Na Declaração Universal dos Direitos da Água, proclama-se um conjunto de princípios e práticas que defendem a água como recurso natural. “*A água é a seiva do planeta*” ou “*A água não é somente uma herança dos nossos predecessores, ela é sobretudo um empréstimo aos nossos sucessores*”, são expressões presentes na Declaração e que revelam a importância da água enquanto condição essencial da vida de todo o ser presente e futuro (APIAM, 2017). A gestão dos recursos naturais no que respeita à sua sustentabilidade, deverá satisfazer as necessidades do presente, garantindo a disponibilidade dos mesmos para as gerações futuras. A água é um recurso finito não só pela quantidade disponível, como pela qualidade para a satisfação das necessidades humanas.

As águas subterrâneas integram a componente não visível do ciclo da água. “*O que os olhos não veem, o coração não sente*” (Silva, 2002 in Foster et al., 2002). Foi desta forma que se encarou a protecção de águas subterrâneas durante muitos anos, e só à medida que se davam os primeiros passos rumo ao entendimento dos processos dinâmicos envolvidos, é que se começou a notar a inversão desta condição.

As águas subterrâneas, englobam as águas minerais naturais<sup>1</sup> e as águas de nascente<sup>2</sup>, que se encontram naturalmente protegidas em aquíferos<sup>3</sup>, dos agentes poluidores. Portugal possui uma riqueza inquestionável neste tipo de águas, pela sua quantidade, variedade e qualidade. Provenientes de aquíferos localizados no interior do subsolo, permitem que estas adquiram uma qualidade excepcional e de singular ligação à natureza.

A fixação de um perímetro de protecção, diminui o risco de contaminação da água dos aquíferos. No caso de ocorrer um evento poluidor, permite tomar medidas atempadas de remediação para que a água chegue às captações com concentrações de poluente consideradas aceitáveis (Lopo Mendonça, 2006). A água subterrânea também desempenha em Portugal um papel valioso no desenvolvimento económico e social, particularmente na agricultura, na indústria e no abastecimento de água para consumo humano, no entanto, a protecção dos aquíferos à poluição deve ser uma preocupação constante. Sendo a água subterrânea, um recurso geológico, assume também um papel fundamental num dos sectores em franco crescimento, como o hidrotermalismo.

A Hidrogeologia é um dos ramos das ciências geológicas que mais se desenvolveu nas últimas três décadas e é entendida como o estudo das águas subterrâneas, que enquadra os encadeamentos entre os processos geológicos e a água (Fetter, 2001). No entanto, o interesse pelo estudo da água encontra-se já bem expresso nos escritos de Leonardo da Vinci (ca. 1508-10, cf. Desmond & Pedretti, 2000), H. Bernard Palissy (1580), Pierre Perrault (1674), Henry Darcy (1856), O. E. Meinzer (1923), Charles Theis (1935) e Tolman (1937). A Hidrogeologia, sendo um ramo da Hidrologia, estuda a ocorrência, a distribuição, o movimento e os fenómenos físico-químicos da água do planeta Terra. É uma área do conhecimento fortemente interdisciplinar. Ao técnico especialista em hidrogeologia é exigido treino em geologia, geomorfologia, hidráulica, matemática, física, química e computação. Possui um grande impacto científico – por vezes social – apoiando-se em instrumentos de modelação geomatemática. O hidrogeólogo, possui as competências que correspondem acções de investigação aplicada, de gestão, de monitorização, de protecção e de conservação – a pensar nas gerações futuras – e, claro, a prospecção, pesquisa e captação, motor de todas as outras medidas (Carvalho, J. M., 2006).

Este tipo de estudos, permite melhorar o conhecimento das unidades hidrogeológicas do território, uma vez que a conceptualização de um aquífero é a unidade fundamental da Hidrogeologia e dos Recursos Hídricos Subterrâneos. Permite ao hidrogeólogo, uma

---

<sup>1</sup> Água considerada bacteriologicamente própria, de circulação profunda, com particularidades físico-químicas estáveis na origem dentro da gama de flutuações naturais, de que resultam propriedades terapêuticas ou simplesmente efeitos favoráveis à saúde.

<sup>2</sup> Águas subterrâneas naturais que se não integram no conceito de recursos hidrominerais, desde que na origem se conservem próprias para beber.

<sup>3</sup> Domínio espacial de uma formação geológica, limitada em superfície e em profundidade, que pode armazenar água em condições de ser explorada economicamente.

avaliação das reservas, a compreensão dos mecanismos de recarga, as conexões hidráulicas, a evolução hidroquímica, a localização das fontes de contaminação e a determinação da vulnerabilidade à poluição<sup>4</sup>, assim como a análise de possíveis riscos.

Existem diversos métodos que permitem estabelecer os perímetros de protecção de captações de água subterrânea e a sua escolha dependerá do tipo de aquífero, do critério delimitador e dos dados disponíveis. Devem ser fundamentados em estudos que permitam caracterizar os aquíferos e o seu grau de vulnerabilidade e risco à poluição.

A utilização dos SIG, veio simplificar a aquisição e o processamento de dados georreferenciados, assim como a sua análise e manipulação. A elaboração de mapas temáticos permite informar as estruturas de planeamento e ordenamento, tanto no sentido de um uso sustentável do recurso, como na demarcação de locais com aptidão (ou não) para implementação de diferentes actividades, em função do impacto que estas podem ter sobre os aquíferos (Xavier et al., 2004). O desenvolvimento de ferramentas computacionais, possibilitou um crescimento na consciência pública, ajustada a uma aplicação de medidas mais rigorosas e a promulgação de novas leis na área dos recursos hídricos.

É fundamental ter a consciência que as águas subterrâneas quando contaminadas, tendem a recuperar a qualidade muito lentamente, sendo mesmo muito difícil recuperar as condições iniciais, mesmo que a fonte poluente se encontre já desactivada. É importante referir também que recuperar as condições iniciais de um aquífero poderá ser um processo muito dispendioso, a nível económico. Além disso, a poluição só é detectada muito tempo após o início do processo (Moinante, 2003). A principal preocupação com a contaminação das águas subterrâneas é o impacto que esta poderá ter na saúde pública e pretende-se com este estudo, auxiliar a tomada de decisão ao nível do planeamento e gestão das águas subterrâneas, de modo a garantir o aproveitamento e a protecção do recurso, possibilitando uma planificação integrada e uma gestão sustentável do mesmo.

## 1.2. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJECTIVOS

Hipócrates foi o primeiro a descrever os efeitos benéficos de determinadas águas minerais, mas também na Grécia antiga, Sócrates, Platão e Aristóteles, abordaram as evidentes propriedades terapêuticas da água. Em Roma, arquitectos e pensadores, referiam-se a essas propriedades curativas das águas e às maravilhas dos banhos a diferentes temperaturas. Também em Portugal, a utilização de água mineral natural, acompanhou a fundação da nossa história, quando em pleno reinado de D. Afonso Henriques, se deu relevância a este tipo de estabelecimentos, como por exemplo as termas de S. Pedro do Sul (antiga *Alafões*). Já D. Leonor de Lencastre, em 1485, mandou edificar um hospital balnear de uma “caldas”,

---

<sup>4</sup> Degradação da qualidade natural da água, em resultado de actividades humanas, tornando-a imprópria como origem de água destinada à produção de água para consumo humano, nos termos dos artigos 13.º a 19.º do Decreto-Lei 236/98 de 1 de Agosto.

que passaram a chamar-se Caldas da Rainha. Estes factos históricos revelam que sempre existiu a “crença” de que as águas têm propriedades curativas. No entanto, só a partir do século XVI é que em Portugal, como em todo o mundo, se intensifica o uso da água para fins terapêuticos. Pouco a pouco, o que seria apenas uma observação empírica, foi dando lugar à ciência, que com a ajuda dos avanços da química analítica, se reflectiu num maior conhecimento deste tipo de água. Francisco da Fonseca Henriques na sua obra intitulada “*Aquilégio Medicinal*”, datada de 1726, refere que “... são as águas que correm e que cruzam as entranhas da terra; o sangue que nas veias circula neste material gigante do mundo; e como do vício do sangue procedem vulgarmente as maiores enfermidades...”, quis o autor mostrar ao mundo o corpo do nosso Portugal, a pureza deste sangue, examinando os minerais destas veias (APIAM, 2017). A Academia das Ciências, criada em 1779 por D. Maria I, ajudou ao desenvolvimento do estudo das águas, congregando os mais destacados nomes da ciência da altura. Contudo só no século XIX, se demonstrou o interesse na protecção de águas medicinais, tomando medidas e encarregando pessoas ou comissões de proceder a estudos laboratoriais e à inventariação e recolha de dados analíticos. Henry Schöeller, investigador de renome na Hidrogeologia no século XX, referia que “*poucos países se interessam tanto pelas águas termominerais como Portugal*” (Schöeller, 1982).

O território português possui a sua riqueza em nascentes termominerais cujas águas são tidas desde há muito tempo, como meios eficazes de cura para muitas doenças e inclusive, consideradas para algumas pessoas, como “santas” (Cavaco, 1979; APIAM, 2017). O termalismo em Portugal vive actualmente uma fase de crescimento, evolução e inovação que visam, não só aperfeiçoar as condições da utilização clássica do termalismo, mas também atrair novos públicos, redireccionando para uma vertente do “Bem-Estar Termal”. A estas práticas está associado um desenvolvimento sócio-económico importante, uma vez que em algumas regiões esta é mesmo a principal fonte de desenvolvimento local/regional, contribuindo para aumentar a empregabilidade da região e fazer com que o comércio local/regional se desenvolva (Marques, 2012; APIAM, 2017).

A inquestionável importância que as águas subterrâneas assumem (Figura 1), em termos de quantidade e qualidade, leva a concluir que é imprescindível a consciencialização de que a melhor forma de garantir a preservação do recurso é proteger as suas origens. O objectivo deste trabalho consiste em demonstrar como os SIG, e as suas capacidades analíticas, disponibilizam ferramentas fundamentais no auxílio da delimitação de perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas, onde a ocupação e gestão do território é colocado muitas vezes à margem das condições básicas necessárias à sua preservação.

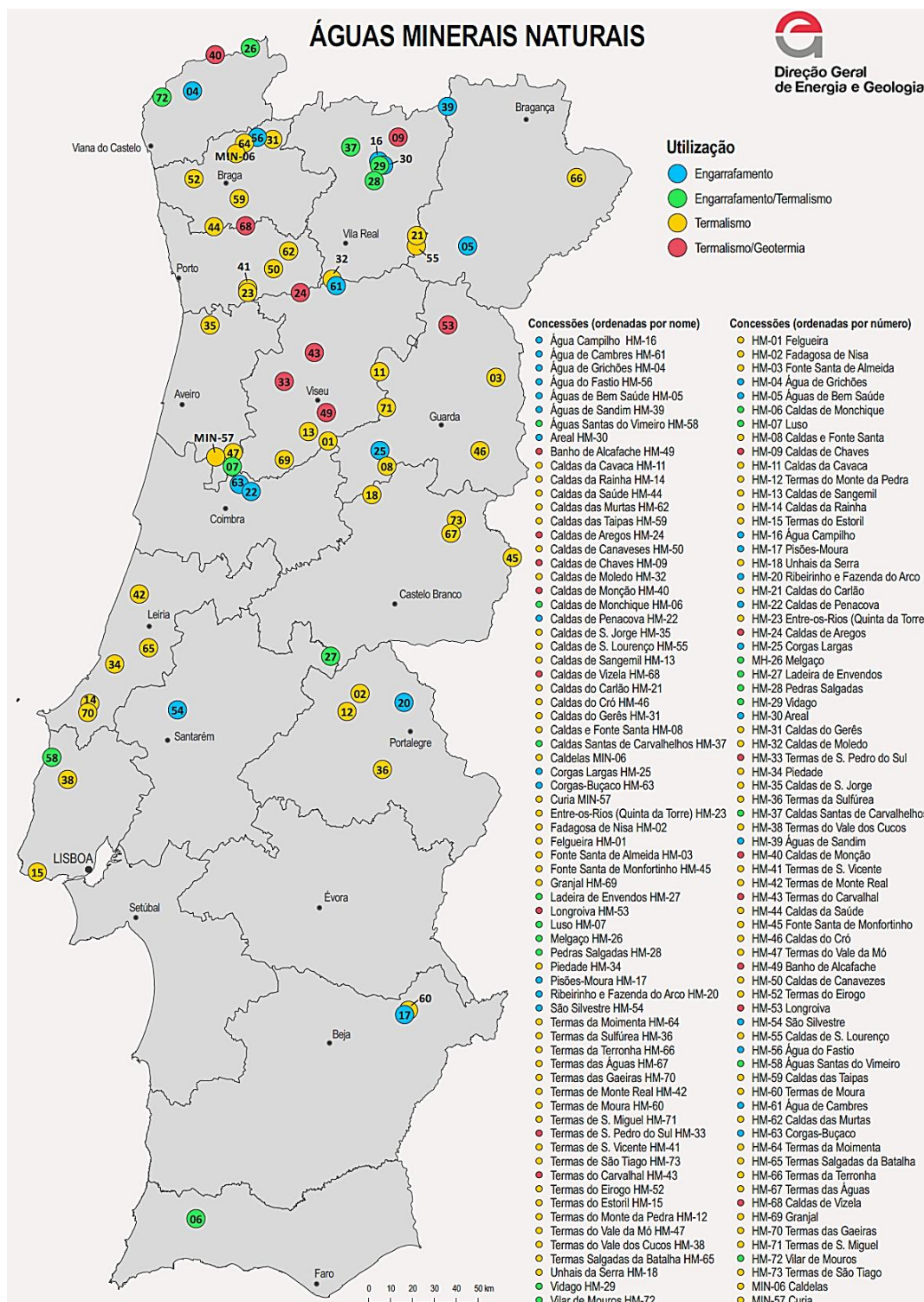


Figura 1 - Localização das águas minerais naturais em Portugal Continental (DGE, 2019).

Este trabalho irá contribuir para a clarificação de algumas ideias e auxiliar na tomada de decisões, com base em conhecimento científico e tecnológico. A metodologia proposta, pretende ser alargada ao entendimento e monitorização do sistema aquífero quando submetido a várias solicitações, com o objectivo de se poder antecipar o seu comportamento, optimizando a sua gestão. Através do processamento automático de um conjunto de informação geográfica, pretende-se:

- \* Armazenar numa base de dados operacional, toda a informação espacial e alfanumérica, referente ao comportamento hidráulico do aquífero em articulação com as restantes condicionantes do meio envolvente;
- \* A metodologia DRASTIC, irá avaliar a vulnerabilidade à poluição do aquífero, possibilitando a modelação de perímetros de protecção da captação de água subterrânea;
- \* Contribuir para a clarificação dos limites de recarga de exploração do aquífero, contribuindo para o ajuste da sua exploração sustentável.

### 1.3. METODOLOGIAS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este estudo decorreu no período de 2019 a 2020, adoptando-se uma metodologia organizada em seis grandes fases, de acordo com o seguinte:

- 1) Fase de diagnóstico, com o objectivo específico de avaliar a importância dos SIG na gestão dos recursos hídricos subterrâneos;
- 2) Pesquisa bibliográfica sobre métodos de quantificação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas e pesquisa de aspectos geomorfológicos, geológicos, tectónicos, hidrogeológicos, hidroquímicos da área de estudo;
- 3) Trabalho de campo, de modo a observar as diferentes litologias existentes, aferição de contactos geológicos, e visitas técnicas às instalações;
- 4) Inventariação das fontes de contaminação existentes no interior do perímetro de protecção, e verificar se está em conformidade com a legislação em vigor;
- 5) Selecção do método de quantificação que melhor se aplica ao objectivo do estudo, tendo em consideração a disponibilidade dos dados.
- 6) Trabalho de gabinete com recursos ao software ArcGIS da ESRI - *Environmental Systems Research Institute*, para modelação e criação de mapas.

A presente dissertação está estruturada em quatro capítulos. No primeiro capítulo é realizado um breve enquadramento do tema em estudo, onde são apresentados os objectivos, estrutura, e o seu enquadramento legal. No segundo capítulo, é elaborada uma revisão bibliográfica sobre a temática da Hidrogeologia das águas subterrâneas. O terceiro capítulo, também ele relativo à revisão bibliográfica, é referente aos modelos de vulnerabilidade, assim como os seus parâmetros e critérios de selecção. Por fim, o quarto capítulo apresenta a área de estudo e as suas características, as metodologias aplicadas, os resultados e as considerações finais, as principais limitações evidenciadas e as perspectivas futuras.

## **2. ENQUADRAMENTO LEGAL**

### **2.1. DISPOSIÇÕES GERAIS**

A Directiva Quadro da Água (Directiva n.º 2000/60/CE), responsabiliza os estados membros da União Europeia, pelo estado quantitativo<sup>5</sup> e qualitativo dos seus recursos hídricos<sup>6</sup>. Exige assim a identificação e a protecção das massas de água destinadas à captação de água para o consumo humano. Esta Directiva é transposta para a lei portuguesa através da Lei da Água (Lei n.º 58/2005 e DL n.º 130/2012, de 22 de Junho, que procede à segunda alteração à Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro), que confere o enquadramento legal para a protecção de captações para o abastecimento público.

Foi na década de 90, que em Portugal com os decretos-lei n.º 84/90, 86/90 e 90/90, que se começou a orientar os princípios para a delimitação de perímetros de protecção para as águas minerais e de nascente. No entanto, só com o decreto-lei n.º 382/99 ficam explícitas as normas e os critérios para a delimitação de perímetros de protecção de águas subterrâneas, com a finalidade de proteger a qualidade das águas dessas captações. Aplicam-se a captações destinadas ao abastecimento público de água para consumo humano de aglomerados populacionais com mais de 500 habitantes ou cujo caudal de exploração seja superior a 100 m<sup>3</sup>/dia. Contempla a definição de três zonas de protecção, com base nos critérios especificados no Art.º 3.º.

### **2.2. QUADRO INSTITUCIONAL**

As principais instituições com responsabilidades e competências nas águas subterrâneas são:

- \* A Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. (APA, I.P.), que, como autoridade nacional da água, tem por missão propor, acompanhar e assegurar a execução da política nacional no domínio dos recursos hídricos de forma a assegurar a sua gestão sustentável, bem como garantir a efectiva aplicação da Lei da Água;
- \* Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos, I. P. (ERSAR), a quem compete averiguar a qualidade da água para consumo humano;

---

<sup>5</sup> O bom estado quantitativo de um meio hídrico subterrâneo infere que o nível freático é tal que os recursos hídricos subterrâneos disponíveis não são ultrapassados pela taxa média anual de captação a longo prazo, não estando sujeito a alterações antropogénicas que possam impedir que sejam alcançados os objectivos ambientais específicos para as águas superficiais que lhe estejam associadas, deteriorar significativamente o estado dessas águas ou provocar danos significativos nos ecossistemas terrestres directamente dependentes do aquífero, podendo ocorrer temporariamente, ou continuamente em áreas limitadas, alterações na direcção do escoamento subterrâneo em consequência de variações de nível, desse que essas alterações não provoquem intrusões de água salgada ou outras e não indiquem uma tendência antropogenicamente induzida, constante e claramente identificada, susceptível de conduzir a tais intrusões.

<sup>6</sup> Os recursos hídricos são as águas superficiais, as águas de transição, as águas costeiras e as águas subterrâneas, que se encontram disponíveis para qualquer tipo de uso numa determinada região.

- \* As Administrações de Região Hidrográfica, I.P. (ARH), que têm por missão proteger e valorizar as componentes ambientais nas águas, bem como proceder à gestão sustentável dos recursos hídricos no âmbito das respectivas circunscrições territoriais de actuação;
- \* A Direcção Geral de Energia e Geologia, I.P. (DGEG), quando estas são consideradas como um recurso geológico, nomeadamente no que diz respeito ao aproveitamento de águas minerais e de nascente para engarrafamento, na actividade termal e no aproveitamento geotérmico.

### 2.3. OBJECTIVOS PARA AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

O Art.º 47.º, da Lei da Água, contempla as medidas destinadas a evitar ou limitar a descarga de poluentes<sup>7</sup> nas águas subterrâneas, e de prevenção da deterioração do estado de todas as massas de águas. O bom estado das águas subterrâneas deverá ser alcançado pela implementação de acções que possibilitem:

- \* Assegurar a protecção, melhoria e recuperação de todas as massas de água subterrâneas, garantindo o equilíbrio entre as captações e as recargas dessas águas;
- \* Inverter quaisquer tendências significativas persistentes para o aumento da concentração de poluentes que resultem do impacte da actividade humana, com vista a reduzir gradualmente os seus níveis de poluição.

### 2.4. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Com o Decreto-Lei n.º 77/2006, de 30 de Março, através do Anexo I, parte II, a Lei da Água caracteriza as águas subterrâneas. Tem em conta a localização e os limites das massas de água subterrâneas e as pressões a que essas massas de águas podem estar sujeitas. São também consideradas, as características gerais dos estratos geológicos que cobrem a área de drenagem que contribui directamente para a recarga do aquífero e também as massas de água subterrâneas que se encontram directamente associadas a ecossistemas aquáticos superficiais ou ecossistemas terrestres dependentes destas. As massas de água subterrâneas que tenham sido consideradas em situação de risco, necessitam de incluir informações relevantes sobre o impacte das actividades humanas, as características geológicas e hidrogeológicas (e.g. a extensão e o tipo de unidades geológicas, a conductividade hidráulica, a porosidade e o confinamento). Inclui ainda características dos solos e depósitos superficiais na área de drenagem que contribui para a recarga (e.g. a espessura, a porosidade, a conductividade hidráulica e as propriedades de absorção desses solos e

---

<sup>7</sup> Considera-se como Poluente qualquer substância susceptível de provocar poluição, definida em normativo próprio (Lei n.º 58/2005 de 29 de Dezembro) e como Poluição a introdução, directa ou indirecta, em resultado da actividade humana, de substâncias que possam ser prejudiciais à saúde humana ou para a qualidade dos ecossistemas.

depósitos); características de estratificação das águas no interior da massa de água; inventário dos sistemas superficiais associados, incluindo ecossistemas terrestres e massas de águas superficiais, com as quais esteja directamente relacionada; estimativas das direcções e caudais de transferência de águas entre massas de água e os sistemas de água superficiais associados; dados suficientes para calcular a taxa de recarga global média anual a longo prazo e as características da componente química das águas, incluindo a especificação do contributo da actividade humana.

## 2.5. PRESSÕES E IMPACTES NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

No Anexo III do mesmo Decreto-Lei, é ainda definida a avaliação das pressões sobre as águas subterrâneas e respectivo impacte. É necessário recolher informações sobre o ordenamento do território na área ou áreas de drenagem a partir das quais a massa de água recebe a sua recarga, incluindo poluentes e alterações antropogénicas das características de recarga (e.g. desvios de águas da chuva das linhas de escoamento por meio de aterros, recarga artificial, diques, drenagem).

## 2.6. PROTECÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

O Decreto-Lei n.º 382/99 de 22 de Setembro, assegura a protecção das águas subterrâneas através da instituição de perímetro de protecção. Consiste na definição de áreas na vizinhança das captações, onde se estabelecem restrições de utilidade pública ao uso e transformação do solo, em função das características inerentes às formações geológicas que armazenam as águas subterrâneas captadas e os caudais extraídos, como forma de salvaguardar a protecção das captações da qualidade dessas águas.

Os perímetros de protecção visam, assim:

- \* Prevenir, reduzir e controlar a poluição das águas subterrâneas por infiltração de águas pluviais lixiviantes e de águas excedentes da rega e de lavagens;
- \* Potenciar os processos naturais de diluição e de autodepuração das águas subterrâneas;
- \* Prevenir, reduzir e controlar as descargas acidentais de poluentes;
- \* Proporcionar a criação de sistemas de aviso e alerta para a protecção dos sistemas de abastecimento de água com origem nas captações de águas subterrâneas, em situações de poluição acidental das mesmas.

A delimitação do perímetro de protecção é realizada recorrendo a métodos hidrogeológicos apropriados que tenham em conta os caudais de exploração, as condições da captação e as características do sistema aquífero explorado. A fixação dos caudais de exploração e o dimensionamento da captação tem de atender, necessariamente a aspectos económicos, já que existem restrições ao uso do solo em áreas significativas que se traduzem em custos económicos que se repercutem sobre o custo da água na origem. Não é uma medida

razoável, delimitar áreas de protecção gigantescas, se tal não se traduzir em benefício efectivo. É assim exigido, que os perímetros de protecção sejam baseados em estudos hidrogeológicos suficientemente intransigentes para evidenciarem a eficácia das medidas de protecção impostas. Sempre que não possam ser realizados estudos (e.g. captações com menos capacidade, o uso do solo é compatível com a protecção das águas subterrâneas), definem-se critérios simples, mas suficientemente rigorosos, que assegurem a efectiva protecção das águas subterrâneas. Na actualidade, é possível utilizar meios informáticos mais desenvolvidos e sofisticados, permitindo o aperfeiçoamento dos métodos utilizados. Sendo o perímetro de protecção definido como a área contígua à captação na qual se interditam ou condicionam as instalações e as actividades susceptíveis de poluírem as águas subterrâneas, englobando as seguintes zonas (Figura 2):

- \* Zona de protecção imediata: área da superfície do terreno contígua à captação em que, para a protecção directa das instalações da captação e das águas captadas, todas as actividades são por princípio proibidas;
- \* Zona de protecção intermédia: área da superfície do terreno contígua exterior à zona de protecção imediata, de extensão variável, tendo em conta as condições geológicas e estruturais do sistema aquífero, definida por forma a eliminar ou reduzir a poluição das águas subterrâneas, onde são interditas ou condicionadas as actividades e as instalações susceptíveis de poluírem aquelas águas, quer por poluição de poluentes, quer por poderem modificar o fluxo na captação ou favorecer a infiltração na zona próxima da captação.
- \* Zona de protecção alargada: área da superfície do terreno contígua exterior à zona de protecção intermédia, destinada a proteger as águas subterrâneas de poluentes persistentes, tais como compostos orgânicos, substâncias radioactivas, metais pesados, hidrocarbonetos e nitratos, onde as actividades e instalações são interditas ou condicionadas em função do risco de poluição das águas, tendo em atenção a natureza dos terrenos atravessados, a natureza e a quantidade de poluentes, bem como o modo de emissão de poluentes.

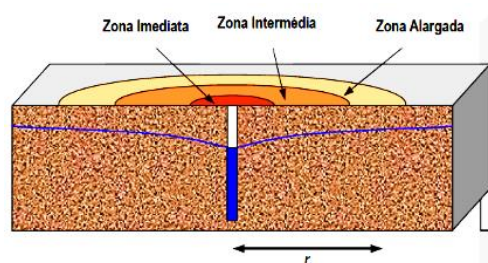


Figura 2 – Representação esquemática das diferentes zonas de protecção de uma captação de água subterrânea (LNEG, 2019).

Em situações em que não seja possível realizar os estudos necessários, e mediante parecer favorável dos organismos da tutela, existe a possibilidade de efectuar a determinação das zonas de protecção através de recurso ao método do raio fixo, calculado de acordo com o anexo do Decreto-Lei, ou outro considerado mais adequado. O perímetro de protecção mediante a realização de estudos hidrogeológicos específicos, poderá ainda não incluir a zona de protecção intermédia ou a zona de protecção alargada, relativamente a captações de águas subterrâneas em sistemas aquíferos cujo risco de poluição seja reduzido. Quando se justificar (e.g. zonas com conexão hidráulica directa ou através de condutas cársticas ou fissuradas), poderá ainda englobar zonas de protecção especial. Em aquíferos costeiros com risco de intrusão marinha<sup>8</sup>, inclui também zonas de protecção especiais como prevenção ao avanço da cunha salina.

No mesmo Decreto-Lei, o Art.º 5.º faz ainda referência à protecção sanitária da captação. No que se refere à protecção da «cabeça» das captações verticais de águas subterrâneas, esta deve estar fechada e a cota superior à do terreno circundante para evitar a entrada de substâncias de qualquer tipo. O revestimento da captação deve ser exteriormente rodeado por uma superfície impermeabilizante.

No Art.º 6.º, são definidas as servidões administrativas e restrições de utilidade pública nas diferentes zonas de protecção às captações. Na zona de protecção imediata é interdita qualquer instalação ou actividade, com excepção das que têm por finalidade a conservação, manutenção e desenvolvimento da exploração da captação. Nesta zona o terreno é vedado e tem de ser mantido limpo de quaisquer resíduos, produtos ou líquidos que possam provocar infiltração de substâncias indesejáveis. Na zona de protecção intermédia podem ser interditas ou condicionadas as actividades e instalações quando se demonstrem serem susceptíveis de provocar poluição da água. Estão indicadas situações relacionadas com: a) pastorícia; b) usos agrícolas e pecuária; c) aplicação de pesticidas móveis e persistentes na água ou que possam formar substâncias tóxicas, persistentes ou bioacumuláveis; d) edificações; e) estradas e caminhos de ferro; f) parques de campismo; g) espaços destinados a práticas desportivas; h) estações de tratamento de águas residuais; i) colectores de águas residuais; j) fossas de esgoto; l) unidades industriais; m) cemitérios; n) pedreiras e quaisquer escavações; o) lagos e quaisquer obras ou escavações destinadas à recolha e armazenamento de água ou quaisquer substâncias susceptíveis de se infiltrarem; q) depósitos de sucata. Na zona de protecção intermédia são interditas as seguintes actividades e instalações: a) infra-estruturas aeronáuticas; b) oficinas e estações de serviço automóveis; c) depósitos de materiais radioactivos, de hidrocarbonetos e de resíduos perigosos; d) postos de abastecimento e áreas de serviços de combustíveis; e) transportes de hidrocarbonetos

---

<sup>8</sup> Processo que consiste no avanço sobre o continente de massas de água salgada.

de materiais radioactivos ou de outras substâncias perigosas; f) canalizações de produtos tóxicos; g) lixeiras e aterros sanitários. Na zona de protecção alargada podem ser interditas ou condicionadas as seguintes actividades e instalações quando se demonstrarem susceptíveis de provocarem a poluição das águas subterrâneas: a) utilização de pesticidas móveis e persistentes na água ou que possam formar substâncias tóxicas, persistentes ou bioacumuláveis; b) colectores de águas residuais; c) fossas de esgoto; d) lagos e quaisquer obras ou escavações destinadas à recolha e armazenamento de água ou quaisquer substâncias susceptíveis de se infiltrarem; e) estações de tratamento de águas residuais; f) cemitérios; g) pedreiras e explorações minerais; h) infra-estruturas aeronáuticas; i) oficinas e estações de serviço automóveis; j) postos de abastecimento e áreas de serviços de combustíveis; l) depósitos de sucata. Na zona de protecção alargada são interditas as seguintes actividades e instalações: a) transportes de hidrocarbonetos de materiais radioactivos ou de outras substâncias perigosas; b) depósitos de materiais radioactivos, de hidrocarbonetos e de resíduos perigosos; c) canalizações de produtos tóxicos; d) refinarias e indústrias químicas; e) lixeiras e aterros sanitários.

Os perímetros de protecção das captações de água subterrânea para abastecimento público para consumo humano são revistos, sempre que se justifique, por iniciativa da direcção regional do ambiente territorialmente competente ou da entidade responsável pela captação.

## CAPÍTULO II

### 3. HIDROGEOLOGIA: CONCEITOS GERAIS

#### 3.1. ORIGEM, DISTRIBUIÇÃO E CIRCULAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Primordialmente, a Terra era um globo incandescente composto de magma. A água libertada pelo magma começou a arrefecer a atmosfera da Terra, até que pudesse permanecer na superfície no estado líquido. A actividade vulcânica ainda continua a introduzir água na atmosfera, aumentando assim o volume de água da Terra (USGS, 2020). Da totalidade da água do planeta, 97% encontra-se nos oceanos. Os restantes 3% correspondem à água doce e distribuem-se da seguinte forma (Figura 3): 77% estão contidos nos glaciares e icebergues e 22% nas águas subterrâneas. Do 1%, 61% encontra-se em lagos, 39% na atmosfera e solos e menos de 0,4% nos rios (IGM, 2001).

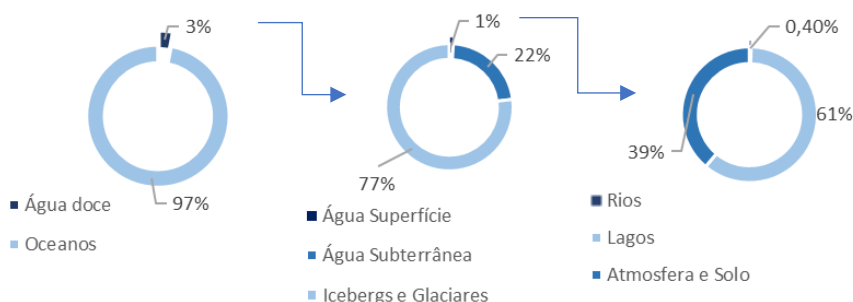


Figura 3 – Distribuição da água na Terra (adaptado de IGM, 2001).

O conceito de ciclo hidrológico (Figura 4) está relacionado com a circulação de água nos seus diferentes estados físicos, entre os oceanos, as calotas de gelo, as águas superficiais, as águas subterrâneas e a atmosfera. O ciclo da água é impulsionado pelo sol, que permite elevar a água da superfície terrestre para a atmosfera, através da evaporação. A gravidade faz com que a água condensada caia, através da precipitação. Nem toda a água que precipita alcança a superfície terrestre, já que uma parte volta a evaporar-se na queda. No entanto, uma vez na superfície, volta a circular através de linhas de água e posteriormente em rios até atingir os oceanos, através do escoamento superficial. Quando se infiltra nos solos e nas rochas, pelos seus poros, fissuras e fracturas, ocorre um escoamento subterrâneo (IGM, 2001).

A evapotranspiração, permite que a água que se infiltra no solo e a que não foi sujeita a evaporação directa para a atmosfera, fique retida na vegetação, que mais tarde a devolve à atmosfera através da transpiração. Este processo ocorre no topo da zona não saturada. A quantidade de água e a velocidade a que esta circula nas diferentes etapas do ciclo hidrológico, está relacionada com diversos factores (e.g. coberto vegetal, altitude, topografia, temperatura, tipo de solo, geologia).

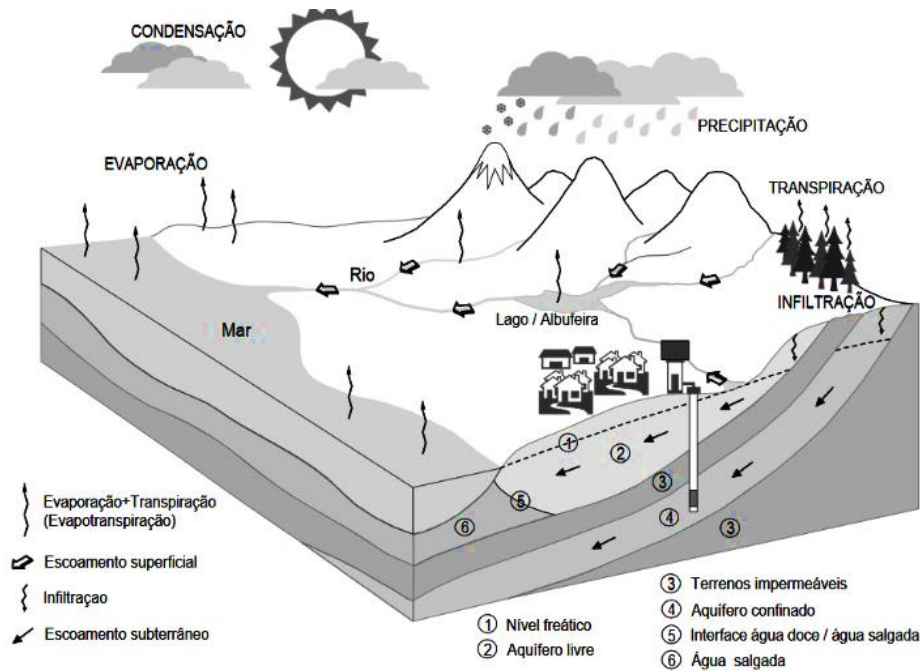


Figura 4 – Representação dos principais componentes do ciclo hidrológico (Ferreira, J., et al., 2012).

A água que continua a infiltrar-se, entra na circulação das águas subterrâneas, quando esta atinge a zona saturada das rochas, preenchendo os poros ou fracturas, contribuindo assim para a recarga dos aquíferos. O nível freático indica o topo da zona saturada. Pode ainda reemergir à superfície, através de nascentes (IGM, 2001). Feitosa & Filho (2000), defendem que na Hidrologia a terminologia de água subterrânea só se aplica a água que circula na zona saturada. Sendo assim, somente uma pequena parte se infiltra no subsolo dando origem a essa designação (Carvalho & Amador, 2001). É esta porção de água que está na origem da água mineral natural e da água de nascente, existindo a necessidade de a proteger, preservar e valorizar.

De acordo com Mook (2000), a água subterrânea que integra o ciclo hidrológico proveniente da precipitação, designa-se por água meteórica. No entanto, parte dessa água não faz parte deste ciclo, o que levou à diferenciação de diferentes tipos de água subterrânea de acordo com a sua origem:

- \* Água juvenil ou primitiva: resulta da desgaseificação do manto (Marsily, 1986);
- \* Água magmática ou vulcânica: está em equilíbrio com o magma (Carrillo, 1978);
- \* Água metamórfica: refere-se aos fluidos de desidratação durante o metamorfismo (Carrillo, 1978);
- \* Água de formação, água intersticial ou água fóssil: retida nos poros das rochas, podendo não corresponder à água presente durante a sua formação (Marsily, 1986).

As águas minerais naturais e as águas de nascente, detêm características que as diferenciam: origem natural identificada, composição físico-química estável, além da própria singularidade, podendo mesmo se afirmar que não existem duas águas iguais. Estas águas são cem por cento naturais e este particular vínculo à natureza em estado puro, é garantido pela legislação específica. É expressamente interdita a utilização de qualquer tipo de tratamento químico em todas as fases do processo, desde a captação até chegar ao consumidor final (APIAM, 2017).

### 3.2. BALANÇO HIDROLÓGICO

Segundo Rodrigues (1986), em termos analíticos é possível exprimir o ciclo hidrológico através de uma equação de balanço (Equação 1), tal que o balanço hidrológico total para uma dada região se pode traduzir por:

$$P + N + D = \Delta S_o + \Delta S_s + \Delta S_g + r_o + r_s + E \quad 1)$$

Onde: (P) representa a quantidade de água recebida na Terra por precipitação (chuva e neve), (N) traduz a intersecção do nevoeiro e (D) a disposição de outros hidrometeoros (orvalho, geada), ( $\Delta S_o$ ), ( $\Delta S_s$ ) e ( $\Delta S_g$ ) incluem as variações das quantidades de água correspondentes ao armazenamento superficial do solo e dos aquíferos, ( $r_o$ ) e ( $r_s$ ) representam as quantidades de água escoada à superfície e no subsolo, por fim (E) quantifica a água devolvida à atmosfera por evaporação e transpiração.

As componentes ( $r_o$ ) e ( $r_s$ ), quando consideradas em relação à secção final dos cursos de água, podem ser agrupadas num único termo (R), que representa o escoamento gerado na área a montante de secção considerada e aglutina as componentes superficial e subterrânea. No entanto, os termos (N), (D) e ( $\Delta S_s$ ), não possuem qualquer significado à escala global, logo não são considerados no balanço hidrológico. Nestas condições a Equação 2 foi simplificada:

$$P = R + E + \Delta S \quad 2)$$

Onde: ( $\Delta S$ ) agrupa as variações de armazenamento superficial e subterrâneo.

Para um período suficientemente longo (um ou mais anos hidrológicos), as variações de armazenamento podem desprezar-se em comparação com os restantes termos da Equação 3, onde:

$$P = R + E \quad 3)$$

### 3.3. PROPRIEDADES DAS FORMAÇÕES GEOLÓGICAS

É essencial conhecer o tipo de rocha e a forma dos espaços vazios onde a água circula e está contida. No entanto, segundo (Fetter, 2001), se a formação geológica não é aquífera, então pode ser:

- \* **Aquitardo:** formação geológica capaz de armazenar grandes quantidades de água, mas que a transmite lentamente, uma vez que é semi-permeável, logo a sua capacidade de drenagem é média a baixa, não permitindo a realização de captações. No entanto, permite recargas verticais de outros aquíferos que se localizem supra-ou subjacentes;
- \* **Aquicludo:** formação geológica que, embora porosa e capaz de armazenar água, não a transmite (a água não circula). É exemplo, uma formação constituída essencialmente por argilas;
- \* **Aquífero:** formação geológica impermeável, incapazes de armazenar e transmitir água, como é o caso de um maciço granítico não alterado e sem fracturação.

No entanto, estes termos encontram-se caídos em desuso na literatura técnica e é frequente a sua substituição dos conceitos, pela designação de camada confinante.

A extracção de água numa captação (Figura 5), furo ou poço, irá provocar alterações no estado de equilíbrio natural do próprio aquífero, mas também dos circundantes. No entanto, é na captação que acontece a maior descida do nível piezométrico (rebaixamento), diminuindo gradualmente à medida que aumenta a distância até a sua influência ser nula. O raio de influência formado em torno da captação é também designado por superfície piezométrica “dinâmica”. Desta forma, definem-se dois níveis da água, o dinâmico que é referente à superfície piezométrica e o estático que corresponde ao existente antes da extracção. A forma do cone de rebaixamento depende fundamentalmente do volume de água extraído e da permeabilidade do aquífero (Moinante, 2002).

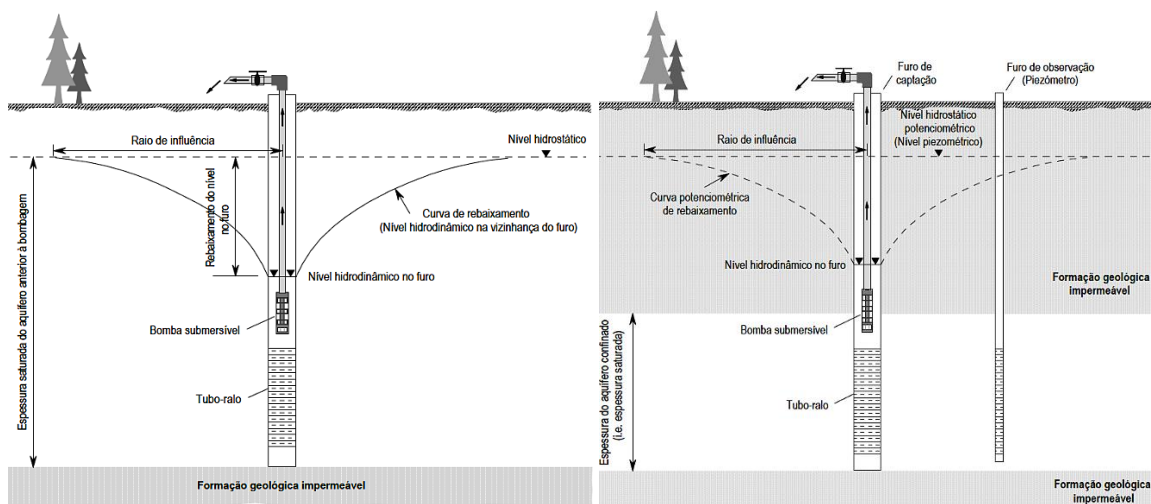


Figura 5 - Esquerda: efeito da bombagem de furos a captar em aquífero livre; Direita: efeito da bombagem de furos a captar em aquífero confinado (Ferreira, J., et al., 2012).

O gradiente hidráulico existente, infere que a escorrência da água de uma determinada área do aquífero durante a extracção se direcione ao furo – zona de contribuição. Dentro da

zona referida, onde ocorre rebaixamento piezométrico e onde as linhas de fluxo se dirigem para a captação, dá-se o nome de zona de chamada (Moinante, 2002).

Por sua vez, a conceptualização dos aquíferos é uma tarefa relevante em qualquer trabalho de investigação hidrológica e, deste modo, estabeleceu-se uma classificação dos aquíferos atendendo à sua estrutura, condições hidráulicas subterrâneas e localização geográfica. Para além da caracterização do tipo e da forma do aquífero, é necessário proceder à quantificação das forças que condicionam a velocidade e o sentido do fluxo de água. O conhecimento do revestimento exterior do aquífero é da maior importância pois dele depende que o sistema se mantenha imune a ataques poluentes (Carvalho & Amador, 2011).

Uma vez que a água subterrânea tem de atravessar e circular através das formações geológicas (Figura 6), estas necessitam ser porosas e permeáveis.

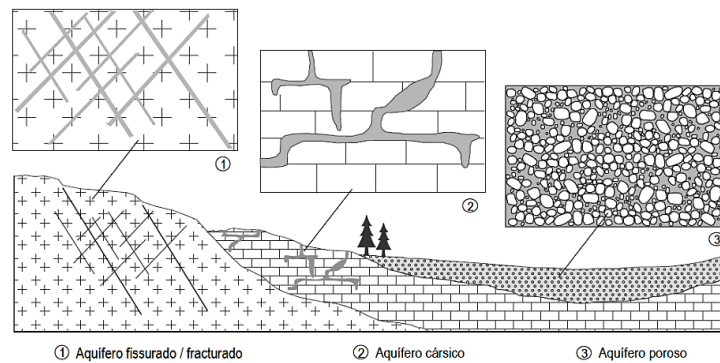


Figura 6 - Classificação dos aquíferos quanto à sua estrutura (Ferreira, J., et al., 2012).

Do ponto de vista estrutural e segundo Moinante (2003), os aquíferos podem ser classificados em:

- \* Aquífero Poroso: a formação geológica contém poros ou interstícios resultantes do arranjo dos materiais que a constituem, deixando espaços vazios (e.g. areias e cascalheiras), que lhe conferem “permeabilidade intersticial”;
- \* Aquífero Fraturado e/ou Fissurado: a formação geológica está associada a descontinuidades geológicas como fissuras, fracturas, falhas e diaclases, que permitem a circulação da água, conferindo-lhe “permeabilidade fissural” (e.g. quartzitos, granitos, xistos não alterados). É este o caso da maior parte das águas minerais naturais e de nascente portuguesas. No entanto, as rochas fracturadas podem ser consideradas meios porosos se: a densidade de fracturação for elevada, a orientação das fracturas não for uniforme, a abertura das fracturas for uniforme e fina e se o volume do aquífero for considerado grande;

- \* **Aquífero Cársico:** a formação geológica é geralmente constituída por rochas carbonatadas com cavidades por vezes de grandes dimensões, resultantes da dissolução dos materiais que a constituem (e.g. calcários), que lhe permitem um rápido escoamento subterrâneo.

Os ensaios de conductividade hidráulica, permitem aferir as heterogeneidades presentes no aquífero. À medida que a água atravessa os diferentes materiais, existe mudança na direcção do fluxo de água subterrânea. A infiltração flui preferencialmente onde a conductividade hidráulica é maior, mesmo que essa direcção não coincida com a do gradiente hidráulico regional (Moinante, 2003).

Segundo Feitosa & Filho (2000), no que respeita às condições hidráulicas (Figura 7), os aquíferos podem ser classificados em:

- \* **Aquífero livre/freático:** formação geológica permeável e parcialmente saturada de água. É limitado na base por uma camada impermeável. No furo do aquífero livre o nível da água não sobe devido ao facto de a água estar à mesma pressão atmosférica, correspondendo ao nível freático. Possuem uma grande capacidade de armazenamento e são recarregados directamente, uma vez que não existe nenhuma barreira que impeça o fluxo descendente a partir da superfície. O nível da água varia de forma proporcional à quantidade de precipitação. São também os que apresentam maiores problemas de contaminação, estando a forma desta se propagar dependente das características da zona não saturada e da profundidade do nível freático;
- \* **Aquífero confinado/artesiano:** formação geológica permeável e completamente saturada de água, sendo limitada no topo e na base por camadas impermeáveis a semi-permeáveis. Um furo que intersecte um aquífero confinado, o nível da água ou nível piezométrico subirá acima do limite superior (tecto) do aquífero até estabilizar num determinado nível. Este fenómeno é conhecido por artesianismo. Diz-se artesianismo positivo se o nível piezométrico atinge e ultrapassa a superfície do terreno na forma de repuxo (furo repuxante); diz-se artesianismo negativo quando o nível piezométrico não atinge a superfície do terreno. O reabastecimento ou recarga dá-se em profundidade, ou através da precipitação em locais onde a formação aflore à superfície;
- \* **Aquífero semi-confinado:** formação geológica limitada superiormente por formações semi-permeáveis, que permitem a passagem de água de outros aquíferos superiores. Permitem a circulação vertical de água, de forma muito lenta, mas que possibilita a sua alimentação. Em caso de bombagem, verificam-se raios de influência intermédios entre os aquíferos livres e confinados.

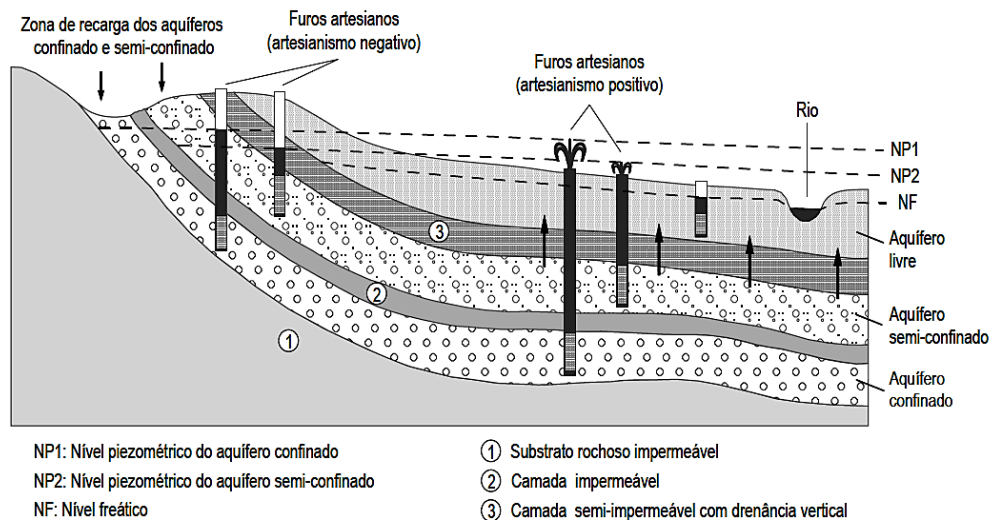


Figura 7 - Tipos de aquíferos consoante as condições hidráulicas e estruturais (Ferreira, J. et al., 2012).

Os aquíferos carsificados e fracturados, podem apresentar elevadas velocidades de fluxo perante situações de recarga rápida, logo o tempo de transporte de um poluente neste tipo de aquíferos é muito inferior ao dos aquíferos porosos granulares (Moinante, 2003).

Segundo Carvalho & Amador (2001), tendo em conta a localização geográfica, os aquíferos podem ainda ser classificados em:

- \* Costeiros: formações geológicas que mantêm uma ligação hidráulica com o mar. Na presença de uma bombagem, é imprescindível a monitorização da interacção entre a água doce e a água salgada;
- \* Interiores ou Continentais: formações geológicas que mantêm uma ligação hidráulica aos rios e lagos. Este tipo de aquíferos podem alimentar um rio ou serem alimentados por este. Assim, os rios denominam-se por rio efluente e rio influente.

### 3.4. ÁREAS DE REABASTECIMENTO DO AQUÍFERO

Segundo Oliveira (2002), as maiores taxas de recarga ocorrem em regiões de fraco declive, bem arborizadas e nos aquíferos livres. A recarga de um sistema aquífero pode acontecer sob diferentes cenários:

- \* Zona de recarga directa: área onde a água da precipitação, ou de outra proveniência, se infiltra directamente no aquífero, através das áreas onde a sua camada superior e permeável, aflora à superfície. Este tipo de recarga pode ainda ocorrer através de fissuras das rochas subjacentes. Nos aquíferos livres, ocorre em toda a sua superfície que se encontra acima do nível freático, enquanto que nos aquíferos confinados, o

reabastecimento ocorre essencialmente nos locais onde a camada portadora de água aflora à superfície;

- \* Zona de recarga indirecta: a recarga dá-se a partir da drenagem superficial das águas e do fluxo subterrâneo indirecto;
- \* Zona de recarga artificial ou induzida: o reabastecimento é efectuado pela acção humana (e.g. transferência de águas de outras fontes por condução directa através de poços ou furos ou infiltração favorecida artificialmente por indução ou alteração das condições naturais).

### 3.5. PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS

Os parâmetros hidrogeológicos representam as características hidráulicas ou hidrodinâmicas (Tabela 1) de uma formação aquífera. Quantificando-se tais parâmetros, é possível prever e expressar a dinâmica de um sistema aquífero.

Tabela 1 - Parâmetros hidrogeológicos e Hidrodinâmicos (adaptado de Carvalho & Amador, 2001).

Tipo	Designação
Função capacitiva	Porosidade eficaz ( $\eta_e$ )
	Coefficiente de armazenamento (S)
	Coefficiente de armazenamento específico (Ss)
Função transmissiva	Permeabilidade (k)
	Transmissividade (T)
Piezometria e gradiente	Nível piezométrico (H)
	Carga hidráulica (h)
	Gradiente hidráulico (i)
Caudal e velocidade	Caudal (Q)
	velocidade efectiva de circulação (Ve)

#### 3.5.1. FUNÇÃO CAPACITIVA

A função capacitiva refere-se ao controlo do volume de água de um aquífero e pode ser avaliada através da porosidade eficaz<sup>9</sup> ( $\eta_e$ ). Os materiais geológicos são constituídos essencialmente pela fase sólida (Vs), líquida (Vw) e gasosa (Va), como se pode observar na Figura 8.

<sup>9</sup> Percentagem do volume total de uma formação geológica que é ocupada por poros interligados, através dos quais se pode estabelecer um fluxo de água.

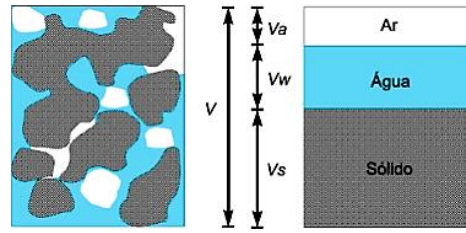


Figura 8 - Fases constituintes de um meio geológico (Matos Fernandes, 2006).

Quando a porosidade ( $\eta$ ) de uma formação geológica depende da forma, do tamanho, do arranjo e da homogeneidade dos grãos, relaciona-se o volume de espaços vazios e o volume total da rocha (Equação 4).

$$\eta = \frac{\text{Volume de vazios}}{\text{Volume total}} \quad 4)$$

A porosidade efectiva ( $\eta_e$ ), mede a percentagem de volume da formação aquífera disponível para armazenamento temporário de água. Calcula-se a relação entre o volume de vazios ocupáveis pela água que circula por acção da gravidade e o volume da formação aquífera (Equação 5).

$$\eta_e = \frac{\text{volume drenado por gravidade}}{\text{volume total}} \quad 5)$$

Na Tabela 2, apresentam-se intervalos de valores da porosidade efectiva para diversos tipos de rochas. Embora uma determinada rocha possa apresentar elevado grau de porosidade, existe sempre uma determinada quantidade de água que fica retida, a qual se designa por retenção específica ( $\eta_r$ ). A porosidade corresponde ao somatório destas duas grandezas (Equação 6) (Meinzer, 1923; Fetter, 2001).

$$\eta = \text{porosidade eficaz } (\eta_e) + \text{retenção específica } (\eta_r) \quad 6)$$

Tabela 2 - Valores de porosidade efectiva (%) para diversos tipos de rocha (adaptado de Morris & Johnson, 1967; Hamill & Bell, 1986; Singhal & Gupta, 2010).

Tipos de Rocha	(%)	Tipos de Rocha	(%)
Areia	10 - 30	Basalto	2 - 10
Argila	1 - 5	Rocha Cristalina	0 - 3
Arenito	5 - 25	Rocha Cristalina fracturada	2 - 5
Calcário	0,5 - 10	Rocha Cristalina alterada	10 - 20
Xisto argiloso	0,5 - 5		

A Tabela 3 indica os valores da Porosidade e Porosidade efectiva para os diversos tipos de rochas segundo Lencastre e Franco (1992). Os valores da porosidade eficaz (%) podem também ser consultados no Decreto-lei n.º 382/99 (Anexo I).

Tabela 3 – Valores da Porosidade e Porosidade efectiva para alguns tipos de Rochas (adaptado de Lencastre e Franco, 1992).

Valores de Porosidade ( $\eta$ ) e Porosidade Efectiva ( $\eta_e$ )										
Material		Porosidade, $\eta$ (%)					Porosidade Efectiva, $\eta_e$ (%)			Observações
Tipo	Descrição	Média	Normal		Extraordinária		Média	Max.	Min.	
			Max.	Min.	Max.	Min.				
Rochas Eruptivas Vulcánicas	Piroclastos e tufos	30,0	50,0	10,0	60,0	5,0	5,0	20,0	0,0	C, E
	Escórias	25,0	80,0	10,0			20,0	50,0	1,0	C, E
	Pormitos	85,0	90,0	50,0			5,0	20,0	0,0	D
	Basaltos compactos	2,0	5,0	0,1			1,0	2,0	0,1	A
	Basaltos vaculares	12,0	30,0	5,0			5,0	10,0	1,0	C
Rochas Eruptivas Plutónicas	Granito	0,3	4,0	0,2	9,0	0,1	0,2	0,5	0,0	A
Rochas Sedimentares Consolidadas	Argilito	5,0	15,0	2,0	30,0	0,5	2,0	5,0	0,0	E
	Arenito	15,0	25,0	3,0	30,0	0,5	10,0	20,0	0,0	F
	Cré brando	20,0	50,0	10,0			1,0	5,0	0,2	B
	Calcário detritico	10,0	30,0	1,5			3,0	10,0	0,5	
	Calcário compacto	8,0	15,0	0,5	20,0		0,5	1,0	0,0	B
	Dolomito	5,0	10,0	2,0			0,5	1,0	0,0	B
Rochas Sedimentares Soltas	Aluviões	25,0	40,0	20,0	45,0	15,0	15,0	35,0	5,0	E
	Dunas	35,0	40,0	30,0			20,0	30,0	10,0	
	Cascalheira	30,0	40,0	25,0	40,0	20,0	25,0	35,0	15,0	
	Loess	45,0	55,0	40,0			5,0	10,0	0,1	E
	Areias	35,0	45,0	20,0			25,0	35,0	10,0	
	Depósitos glaciares	25,0	35,0	15,0			15,0	30,0	5,0	
	Siltos	40,0	50,0	35,0			10,0	20,0	2,0	E
	Argilas pouco consolidadas	45,0	60,0	40,0	85,0	30,0	2,0	10,0	0,0	E
Solos superficiais	50,0	60,0	30,0			10,0	20,0	1,0	E	
Rochas Metamórficas		0,5	5,0	0,2			0,5	2,0	0,0	A

A -  $\eta$  e  $\eta_e$  aumentam com a meteorização; B -  $\eta$  e  $\eta_e$  aumentam devido a fenómenos de dissolução; C -  $\eta$  e  $\eta_e$  diminuem com o tempo; D -  $\eta$  pode diminuir e  $\eta_e$  aumentar com o tempo; E -  $\eta$  é muito varável, dependendo das circunstâncias; F - varável segundo o grau de cimentação e solubilidade.

O coeficiente de armazenamento (S) é analisado através de ensaios de caudal, permitindo avaliar a capacidade de libertação de água em cada formação geológica. Calcula-se pela razão entre o volume de água libertado por uma coluna de aquífero de altura igual à sua espessura e secção unitária, ao diminuir a carga hidráulica (nível piezométrico) de uma unidade (Equação 7).

$$S = \frac{\text{volume de água drenado (V)}}{\text{Área (A)} \times \text{variação da carga hidráulica } (\Delta h)} \quad 7)$$

No caso dos aquíferos livres, a água é libertada quase toda por drenagem gravítica, logo o seu valor coincide com a porosidade eficaz, podendo oscilar entre 0,01 e 0,4. No caso dos aquíferos confinados ou semi-confinados, está dependente da gravidade, da compactação do terreno e da compressibilidade e densidade do fluido, passando a designar-se por

Coefficiente de armazenamento específico (Ss), variando entre 0,01/m (argilas plásticas) e  $1 \times 10^{-7}$ /m (rochas cristalinas) (Brassington, 2007).

### 3.5.2. FUNÇÃO TRANSMISSIVA

A função transmissiva, refere-se à facilidade com que as formações geológicas são atravessadas pela água.

A permeabilidade permite aferir a capacidade do aquífero para transmitir água, e pode ainda subdividir-se em permeabilidade efectiva/conductividade hidráulica e permeabilidade intrínseca (Fetter, 2001). A permeabilidade efectiva é simbolizada pelo coeficiente de permeabilidade (K) e depende das características texturais do meio físico (porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas) e do fluido (viscosidade e massa específica). Já a permeabilidade intrínseca está associada exclusivamente com as características internas do meio (porosidade, granulometria e disposição estrutural). A permeabilidade pode ser determinada pela Lei de Darcy (Figura 9), em caso de escoamentos laminares, que indica que o caudal (Q), que atravessa um meio permeável é proporcional à área de passagem do meio, normal ao fluxo, e ao gradiente do nível piezométrico entre a entrada e saída do fluxo (Equação 8):

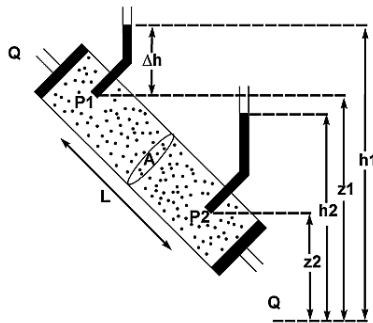


Figura 9 - Representação esquemática da Lei de Darcy (adaptado de Feitosa & Filho, 2000).

$$Q = K \times A \times \frac{(h_1 - h_2)}{L} = K \times A \times i \quad 8)$$

Onde: Q – caudal ( $L^3/T$ ); K – conductividade hidráulica ( $L/T$ ); A – área da secção transversal do cilindro ( $L^2$ );  $h_1$  – carga hidráulica no piezômetro 1 (L);  $h_2$  – carga hidráulica no piezômetro 2 (L);  $Z_1$  – cota do piezômetro 1 (L);  $Z_2$  – cota do piezômetro 2 (L) e  $i$  – gradiente hidráulico.

Uma vez que a velocidade média de escoamento é a razão entre o caudal e a área da secção, a equação pode ser simplificada (Equação 9):

$$v = \frac{Q}{A} = K \cdot i \quad 9)$$



Onde: T – Transmissividade (L<sup>2</sup>/T); K – condutividade hidráulica (L/T) e (e) – espessura saturada do aquífero (L).

Deste modo, aplica-se particularmente a aquíferos confinados, uma vez que nos aquíferos livres a espessura pode ser alterada devido à recarga ou descarga.

## 4. HIDROGEOQUÍMICA DAS ÁGUAS MINERAIS

### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A água mineral natural possui uma composição físico-química própria e características únicas que lhe permitem tornar-se um factor essencial para a saúde humana (Teixeira, 2012). Do ponto de vista geológico o conceito de água mineral deve empregar-se quando alguns dos seus componentes forem superiores ao considerado normal para as águas subterrâneas, por exemplo: mineralização total > 100 mg/L, total de CO<sub>2</sub> livre > 1000 mg/L, sulfuração total > 1 mg/L, flúor > 2 mg/L, lítio > 1 mg/L, sílica > 50 mg/L, entre outros (Calado, 1995).

### 4.2. PARÂMETROS ORGANOLÉPTICOS E FÍSICO-QUÍMICOS

As singulares características organolépticas das águas subterrâneas, caracterizam-na como água incolor, sem turvação e inodora. Relativamente ao sabor, trata-se de um parâmetro que depende do tipo de sais e outros sólidos dissolvidos. Os componentes químicos são os responsáveis pela alteração do sabor da água (Tabela 6) (Feitosa & Filho, 2000).

Tabela 6 - Tipo de sabor da água consoante os componentes químicos (adaptado de Feitosa & Filho, 2000; Ferreira, M.,2013).

Componentes químicos	Sabor da água
Cloreto de sódio	Salgado
Sulfato de sódio	Ligeiramente salgado
Bicarbonatado de sódio	Ligeiramente salgado a doce
Carbonato de sódio	Amargo e salgado
Cloreto de cálcio	Fortemente amargo
Sulfato de cálcio	Ligeiramente amargo
Sulfato de magnésio	Ligeiramente amargo em saturação
Cloreto de magnésio	Amargo e doce
Gás carbónico livre	Picante

No entanto, a classificação das águas minerais naturais é fundamentada em algumas das suas características físico-químicas, tais como:

- \* Temperatura: nas águas subterrâneas mantém-se pouco variável ao longo do ano e corresponde às temperaturas atmosféricas do lugar, acrescidas do produto da profundidade pelo gradiente geotérmico (em média, 1°C/33m). A Tabela 7, classifica as águas de acordo com o critério de Schöeller (1962):

Tabela 7 - Tipo de água consoante a sua temperatura (adaptado de Schöeller, 1962; Ferreira, M., 2013).

Tipo de água	Relação entre $T_m$ e T
Águas hipertermias ou termiais	$T > T_m + 4^{\circ}\text{C}$
Águas ortotermiais ou normais	$T = T_m, \text{ a } T_m + 4^{\circ}\text{C}$
Águas hipotermiais ou frias	$T < T_m$

(T) representa a temperatura da água e ( $T_m$ ) a temperatura média anual do ar na região.

- \* pH (escala Sorensen): influenciado pela origem da água e pela natureza geológica do seu percurso, é medido o número de iões ( $\text{H}^+$ ), correspondendo ao logaritmo decimal negativo, e varia entre 0 e 14, sendo ácidas com valores abaixo dos 7 e básicas ou alcalinas com valores acima dos 7 (Ferreira, M., 2013).
- \* Dureza: refere-se à concentração de iões, predominantemente de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) (Tabela 8), sendo a concentração de cálcio a principal responsável pela concentração deste parâmetro (Ferreira, M., 2013).

Tabela 8 - Tipo de água consoante a sua dureza (adaptado de Ferreira, M., 2013).

Dureza total (mg/L de $\text{CaCO}_3$ )	Tipo de água
< 70	Muito branda
70 - 135	Branda
135 - 200	Dureza média
200 - 350	Dura
> 350	Muito dura

- \* Resíduo seco ou mineralização total: total de sais minerais dissolvidos numa determinada água (APIAM, 2017). De acordo com o valor do resíduo seco, e segundo a legislação europeia (Tabela 9), as águas minerais classificam-se como:

Tabela 9 - Tipo de água consoante o total de resíduo seco ou mineralização total (adaptado de APIAM, 2017; Ferreira, M., 2013).

Tipo de água	Resíduo seco ou mineralização total (mg/L)
Hipossalinas ou muito pouco mineralizadas	< 50
Debilmente ou pouco mineralizadas	50 - 500
Mesossalinas ou mineralizadas	500 - 1500
Hipersalinas ou fortemente mineralizadas	> 1500

- \* Concentração em aniões: maior presença de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) e sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ); (Teixeira, 2017). Mediante a percentagem do anião dominante (Tabela 10), a classificação designa-se como:

Tabela 10 - Tipo de água consoante o teor do anião dominante (adaptado de Teixeira, 2017).

Tipo de água	Teor no anião dominante (mg/L)
Bicarbonatadas	teor de bicarbonatos superior a 600
Sulfatadas	teor de sulfatos superior a 200
Cloretadas	teor de cloretos superior a 200

- \* Concentração em catiões: a partir da classificação principal, é adoptada uma classificação secundária com base no catião predominante (Tabela 11) (Cortez, 2012). As maiores concentrações correspondem à presença de sódio ( $\text{Na}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), e a classificação designa-se como:

Tabela 11 - Tipo de água consoante o teor do catião dominante (adaptado de Cortez, 2012; Ferreira, M., 2013).

Tipo de água	Teor no catião dominante (mg/L)
Sódicas	teor de sódio superior a 200
Cálcicas	teor de cálcio superior a 150
Magnesianas	teor de magnésio superior a 50

- \* Conductividade eléctrica: capacidade de uma água para conduzir a corrente eléctrica, através dos sais dissolvidos sob a forma iónica. A classificação da mineralização e da qualidade das águas com base na conductividade eléctrica (Tabela 12), segundo (Mendes & Oliveira, 2004):

Tabela 12 - Classificação da mineralização e da qualidade das águas com base na conductividade eléctrica (adaptado de Mendes &amp; Oliveira, 2004; Ferreira, M., 2013).

Conductividade eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	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	Muito importante	Difícilmente utilizável
> 1500	Excessiva	Não utilizável na rega

- \* Sólidos dissolvidos totais (SDT): para além das substâncias dissolvidas na água, inclui a matéria orgânica e outras substâncias inorgânicas.
- \* Alcalinidade total: capacidade da água para neutralizar ácidos, destacando-se a presença de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos.

#### 4.3. DIAGRAMAS HIDROGEOQUÍMICOS

Os diagramas hidrogeoquímicos sintetizam a informação, averiguam variações temporais e espaciais e realçam a relação entre os iões de uma ou mais amostras de águas. Existem diversos diagramas, tais como do tipo triangular (Piper), poligonal (Stiff), semi-logarítmico (Schoeller-Berkaloff), entre outros.

O diagrama de Piper (Figura 10) representa as concentrações dos aniões e catiões em dois triângulos separados, e projecta-os num campo onde é possível classificar as águas em função da sua composição das espécies iónicas dominantes. Permite projectar ainda um grande número de amostras.

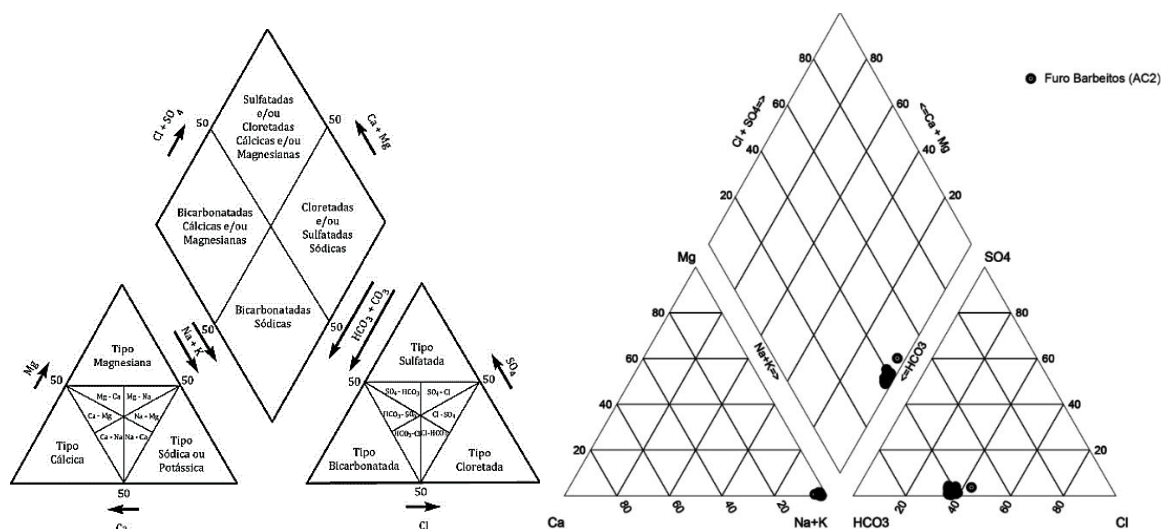


Figura 10 – Esquerda: Diagrama de Piper com indicação das fácies hidrogeoquímicas (adaptado de Custódio & Llamas, 2001; Fetter, 2001; Ferreira, M., 2013); Direita: Exemplo de Diagrama de Piper com a tipologia da água do furo Barbeitos (AC2) de Entre-os-Rios (Ferreira, M., 2013).

O diagrama de Stiff (Figura 11), é formado por quatro rectas paralelas, igualmente espaçadas e intersectadas por um recta vertical. Do lado esquerdo situam-se os catiões (Na, K, Ca, Mg, Fe) e do lado direito os aniões (Cl, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>), expressos em meq/L ou em percentagem. A visualização da fácies hidrogeoquímica ocorre com a união das extremidades que delimita um polígono característico de cada água. Este tipo de representação facilita a representação, permite comparar rapidamente amostras, e por isso são também ideais para representar em mapas.

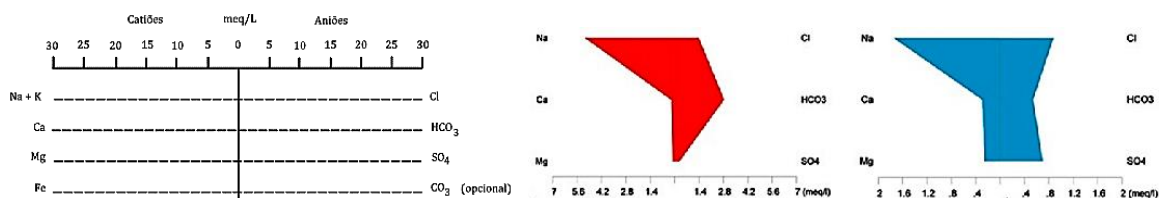


Figura 11 – Esquerda: Diagrama de Stiff (Sanders, 1998); Direita: Exemplo de um Diagrama de Stiff, sendo em vermelho a água mineral e em azul a água normal da zona de Entre-os-Rios (Teixeira, 2011; Ferreira, F., 2013).

#### 4.4. TIPOS HIDROGEOQUÍMICOS

Segundo Ivanov (1979), sobre a classificação genética é possível observar características semelhantes nos diferentes tipos de água mineral, quando são idênticas as condições geoquímicas e geológico-estruturais. Existem três situações que permitem explicar fundamentalmente a mineralização da água, tais como:

- \* Vulcanismo activo recente: as águas são muito quentes e mineralizadas, devido à presença de gases vulcânicos e termometamórficos;
- \* Processos magmáticos ou termometamórficos profundos: a composição gasosa da água é representada sobretudo pelo CO<sub>2</sub>.

- \* Ausência de magmatismo e de processos termometamórficos: a dissolução dos minerais que formam a rocha e as reacções bioquímicas, são responsáveis pela mineralização da água. Os gases dominantes são os da atmosfera, ou os relativos às reacções bioquímicas (e, eventualmente, termoquímicas).

Calado (1995), propôs para Portugal Continental uma classificação de tipos hidrogeoquímicos, com o propósito de facilitar a identificação directa do essencial da composição química de cada água e relacionar essas características com as condições geológicas regionais. Os nove tipos propostos foram os seguintes: sulfúrea sódica, gasocarbónica, bicarbonatada sódica, bicarbonatada cálcica, cloretada sódica, cloretada em ambiente metalífero, sulfatada em ambiente evaporítico, sulfatada cálcica em ambiente metalífero e oxidrilada. As águas sulfúreas sódicas ou sulfúreas alcalinas, distinguem-se pelo cheiro característico a “ovos podres”, devido ao facto de conterem formas reduzidas de enxofre e por outro conjunto de características que as diferenciam de outras águas com cheiro idêntico. As águas gasocarbónicas destacam-se pelo facto de possuírem concentrações de CO<sub>2</sub> livre que excedem os 500 mg/L, pH ligeiramente ácido (entre 6 e 7), normalmente são águas frias (excepção as Caldas de Chaves, com 75 °C), mineralização total muito elevada (> 1 g/L). São águas bicarbonatadas sódicas (excepção as de Melgaço, que é bicarbonatada cálcica), as que apresentam teores de flúor superiores a 1 mg/L. As águas bicarbonatadas, cloretadas e sulfatadas, são águas onde o ião dominante representa mais de 50% do total dos meq/L. No caso da classificação sódica, cálcica e magnésiana, o significado é o mesmo, mas para o catião dominante. A designação de ambiente metalífero, foi criada para realçar as águas com grandes concentrações de elementos metálicos (e.g. cobre, chumbo e zinco). As águas sulfatadas são extremamente ácidas, e as sulfatadas cálcicas em ambiente evaporítico, estão associadas ao sal-gema e gesso (exemplo as águas de Monte Real e da Curia). Já o tipo oxidrilada, refere-se exclusivamente à água de Cabeço de Vide (Alto Alentejo), conhecida como água sulfúrea alcalina, com características únicas. Calado (2001), refere ainda que existe um grupo designado por sulfídrica, onde se inserem as águas cloretadas sódicas e sulfatas cálcicas de zonas sedimentares e metassedimentares. A classificação dos aquíferos onde ocorrem águas minerais tende a seguir a classificação das águas neles contidas.

A distribuição de águas minerais naturais em Portugal Continental não é uniforme (Figura 12), verificando-se uma maior concentração na zona norte e centro, fundamentada maioritariamente pela divisão de Portugal em áreas com características geológicas estruturais diferenciadas. Encontra-se associadas a grandes acidentes tectónicos como a falha de Penacova-Régua-Verin ou a falha Manteigas-Vilariça-Bragança. É geralmente na intersecção entre grandes falhas regionais e suas conjugadas, que se geram as condições adequadas para a ascensão dos fluidos provenientes de zonas profundas da crosta.

Portugal pode ser dividido em duas grandes áreas hidrominerais, tendo em conta a ocorrência de águas minerais naturais:

- \* Região Norte do Maciço Hespérico: a ocorrência e circulação das águas é controlada por falhas profundas, envolvendo fluidos gerados em profundidade em processos metamórficos e/ou magmáticos. Destacam-se as águas sulfúreas sódicas e as águas gasocarbónicas;
- \* Região Centro e Sul de Portugal: as águas minerais são influenciadas principalmente por processos de dissolução da rocha, embora o controlo estrutural tenha também influência. Na Zona Centro-Ibérica existem águas com baixos valores de mineralização, que resultam na sua maioria, da circulação de águas meteóricas através de fissuras existentes nas rochas graníticas e em formações quartzíticas.



Figura 12 - Distribuição e quimismo das águas minerais em Portugal Continental (DGEG, 2019).

#### 4.5. PROJECTO HIDROGENOMA

Em 2010, A DGEG foi promotora de um estudo sobre o metagenoma das águas minerais naturais, de modo a englobar as vertentes da hidrogeologia, da microbiologia e da geoquímica, numa perspectiva multidisciplinar. Os sistemas hídricos subterrâneos são cada vez mais vistos como ecossistemas. O Projecto realizou um inventário de grande parte das águas minerais naturais utilizadas em Portugal Continental para termalismo. Posteriormente foram agrupadas em “grupos tipo”, consoante as características da geologia, o tipo hidrogeoquímico, a temperatura de ocorrência e o microbismo presente.

##### 4.5.1. FACTORES-CHAVE

A DGEG, reconhece a importância de valorizar a exploração sustentada das águas minerais naturais. Sendo um projecto inovador, torna Portugal pioneiro num estudo que contempla a caracterização do microbismo natural deste tipo de águas, permitindo ainda ampliar o conhecimento dos circuitos subterrâneos. A credibilização do termalismo português demarcado para cada estância termal, possibilita a entidade de indicações terapêuticas cientificamente definidas, promovendo a saúde e bem-estar. Promove ainda o desenvolvimento de produtos derma-cosméticos com fins medicinais, a partir de águas termais. Impulsiona a produção de energia eléctrica, através da Geotermia, uma vez que o estudo metagenómico de cada água permite obter informações sobre pressões e temperaturas existentes na formação geológica. O sublime número de estâncias termais existentes no país, assim como a diversidade de tipos de água e a sua ampla distribuição geográfica, tornam Portugal num país com elevado potencial hidrológico. Impulsionar o termalismo português como produto para o desenvolvimento socio-económico de certas regiões do interior do país, é promover o desenvolvimento económico nacional (DGEG, 2019).

##### 4.5.2. OBJECTIVOS

Na componente da geologia é demonstrar a interacção entre rocha-água-microorganismos, para desenvolver uma primeira hipótese de correlação entre a dinâmica dos microorganismos identificados com o quimismo das águas minerais naturais e o meio geológico envolvente. Foi inventariado o enquadramento hidrogeológico para cada uma das águas, incluindo a descrição do modelo conceptual do sistema aquífero, bem como a respectiva utilização actualmente em contracto, o perímetro de protecção e a caracterização físico-química da água. Já na componente da biologia, é estudar o microbismo natural das águas seleccionadas, através da identificação metagenómica dos respectivos microorganismo existentes, associando as características físico-químicas das águas (DGEG, 2019).

#### 4.5.3. PERSPECTIVAS FUTURAS

A disponibilidade dos dados através de uma plataforma digital e interactiva, permite a divulgação desses dados de forma a potenciar a realização de estudos subsequentes que completem este primeiro grande passo na história das águas minerais naturais de Portugal Continental. A associação entre o microbismo e as principais características geológicas, poderá ainda ser individualmente analisado, identificando as indicações terapêuticas relacionadas (DGEG, 2019).

## CAPÍTULO III

### 5. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS À POLUIÇÃO

#### 5.1. TIPOS DE POLUIÇÃO DE ACORDO COM A SUA ORIGEM E OCUPAÇÃO DO SOLO

Tendo em conta a origem da fonte de poluição e sua dispersão pelo solo, consideram-se três tipos de poluição (Foster et al., 2002):

- \* Poluição pontual: resulta do lançamento de poluentes num determinado local (derrames acidentais, lixeiras, descargas de instalações industriais e domésticos). É de fácil localização, identificação e consequente monitorização;
- \* Poluição difusa: afecta uma área mais extensa, tornando mais difícil o seu controle e a posterior recuperação dos aquíferos contaminados. A actividade agrícola tem uma grande responsabilidade devido ao uso excessivo e por vezes inadequado de fertilizantes, pesticidas e herbicidas;
- \* Poluição linear: segundo Leitão (1997), pode ocorrer quando a rejeição de poluentes se verifica sobre um determinado alinhamento, afectando principalmente as zonas envolventes ao local de rejeição, destacando-se a zona a jusante. Um exemplo deste tipo de poluição pode ser a rejeição de efluentes líquidos ao longo de linhas de água, cursos de água poluídos, poluição ao longo de estradas e vias férreas, condutas de gás e petróleo e colectores de águas residuais.

No entanto, são as actividades antropogénicas (Figura 13) as grandes responsáveis pela alteração do uso do solo, modificando as suas características físicas, químicas e biológicas, assim como as da água com as quais interage.



Figura 13 - Processos mais comuns envolvidos na contaminação de águas subterrâneas (Foster et al., 2002).

A impermeabilização do solo, diminui a infiltração eficaz, podendo mesmo alterar o carácter do fluxo subterrâneo. Segundo Zoby e Oliveira (2005), as principais actividades antropogénicas susceptíveis de alterar a qualidade da água subterrâneas são:

- \* Forma de construção da captação: localização inadequada, ausência de protecção da zona circundante, de lajes de protecção e de revestimento interno, assim como filtro inadequado à formação geológica. É imprescindível os poços abandonados, serem devidamente lacrados a fim de não se tornarem fontes de contaminação para o aquífero;
- \* Ausência ou manutenção fraca das redes de saneamento: poderá ocorrer infiltração de águas residuais no solo, podendo ser detectada através de elevadas concentrações de nitrato, ou presença de bactérias patogénicas e vírus;
- \* Aterros sanitários: a decomposição anaeróbia da matéria orgânica produz efluentes líquidos que ao se infiltrarem, podem contaminar solos e águas subterrâneas, mesmo cumprindo as regras de instalação, se não existir uma rigorosa monitorização;
- \* Aumento da produtividade agrícola: recorre ao uso de fertilizantes e agrotóxicos, sendo o azoto (ocorrendo principalmente sob a forma de nitratos) o que representa maior advertência em concentrações elevadas;
- \* Indústria/produtos tóxicos: a utilização de produtos tóxicos na indústria e a ocorrência de acidentes ou fugas nos processos productivos e de armazenamento, representam graves riscos para o ambiente e saúde pública;
- \* Hidrocarbonetos: a produção, o uso e o transporte de combustíveis, envolve o uso de tanques que são susceptíveis a acidentes e fugas.
- \* Indústria mineira: as águas em contacto com os resíduos da exploração mineira apresentam um pH muito ácido, elevados valores de ferro, sulfato e outros elementos que alteram o uso do solo e põem em risco a flora e a fauna aquática;
- \* Cemitérios e hospitais: relacionada com a alteração da qualidade química e com a presença de microorganismos;
- \* Transporte atmosférico: os contaminantes podem viajar e depositarem em partículas directamente na água superficial ou infiltrarem-se no solo e posteriormente no aquífero.

## 5.2. VULNERABILIDADE E RISCO DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A necessidade de protecção de uma captação de água subterrânea envolve considerar a vulnerabilidade de um aquífero à poluição. É necessário conhecer as características intrínsecas do aquífero, estimando a sensibilidade que apresenta à poluição, sendo possível antecipar um cenário de resposta a uma eventual contaminação.

O conceito de vulnerabilidade surgiu intuitivamente a partir da década de 1970, na França por (Albinet e Margat, 1970), que definiram vulnerabilidade como a maior ou menor

capacidade de atenuação das camadas superiores do aquífero à passagem de poluentes e de maneira mais ampla na década de 1980 por (Haertle, 1983; Aller et al., 1987; Foster e Hirata, 1988). Uma definição útil e consistente seria considerar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação como o conjunto de características intrínsecas dos estratos que separam o aquífero saturado da superfície do solo, o que determina sua susceptibilidade a sofrer os efeitos adversos de uma carga de contaminantes aplicada na superfície (Foster, 1987). Dentro deste conceito Gómez, M. (1998), distinguiu dois tipos de conceitos de vulnerabilidade:

- \* Vulnerabilidade intrínseca: em função das características hidrogeológicas do aquífero;
- \* Vulnerabilidade específica ou integrada: para além das características hidrogeológicas do aquífero, inclui alguns factores de carácter externo (e.g. ocupação de solo, tipo de contaminante).

Lobo-Ferreira e Cabral (1991), definiram o conceito de vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas em Portugal baseado nas conclusões da conferência internacional sobre “*Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants*”, realizada em 1987 (Duijvenbooden & Waegeningh, 1987). Ficou assim definida como sendo a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente específica, em função das características intrínsecas do aquífero. O risco de poluição depende da vulnerabilidade e da existência de cargas poluentes consideráveis que possam atingir o aquífero. No entanto, este pode apresentar um elevado índice de vulnerabilidade, mas sem risco de poluição, e vice-versa. Significa que o risco de poluição está sujeito às características intrínsecas do aquífero, mas também à existência de actividades poluentes (Lobo-Ferreira et, al. 2004).

De acordo com a *Environment Agency (EA, 2004)*, os principais factores que permitem avaliar a vulnerabilidade de um aquífero são:

- \* Tipo e natureza do solo, incluindo as propriedades físicas que possam afectar o fluxo vertical da água e a capacidade de depuração do solo;
- \* Presença e natureza da corrente de água, incluindo tipo e espessura;
- \* Profundidade do nível freático, uma vez que a zona não saturada pode atenuar a contaminação por processos físicos, químicos e biológicos;
- \* Mecanismo de fluxo da água subterrânea.
- \* Uma vez que não existem aquíferos invulneráveis, a avaliação da vulnerabilidade deve ser uma operação contínua, constituindo uma ferramenta importante para as entidades gestoras e utilizadores das águas subterrâneas.

Lobo-Ferreira e Oliveira (1993), publicam o mapa da vulnerabilidade clássica" à poluição das águas subterrâneas de Portugal Continental (Figura 14).

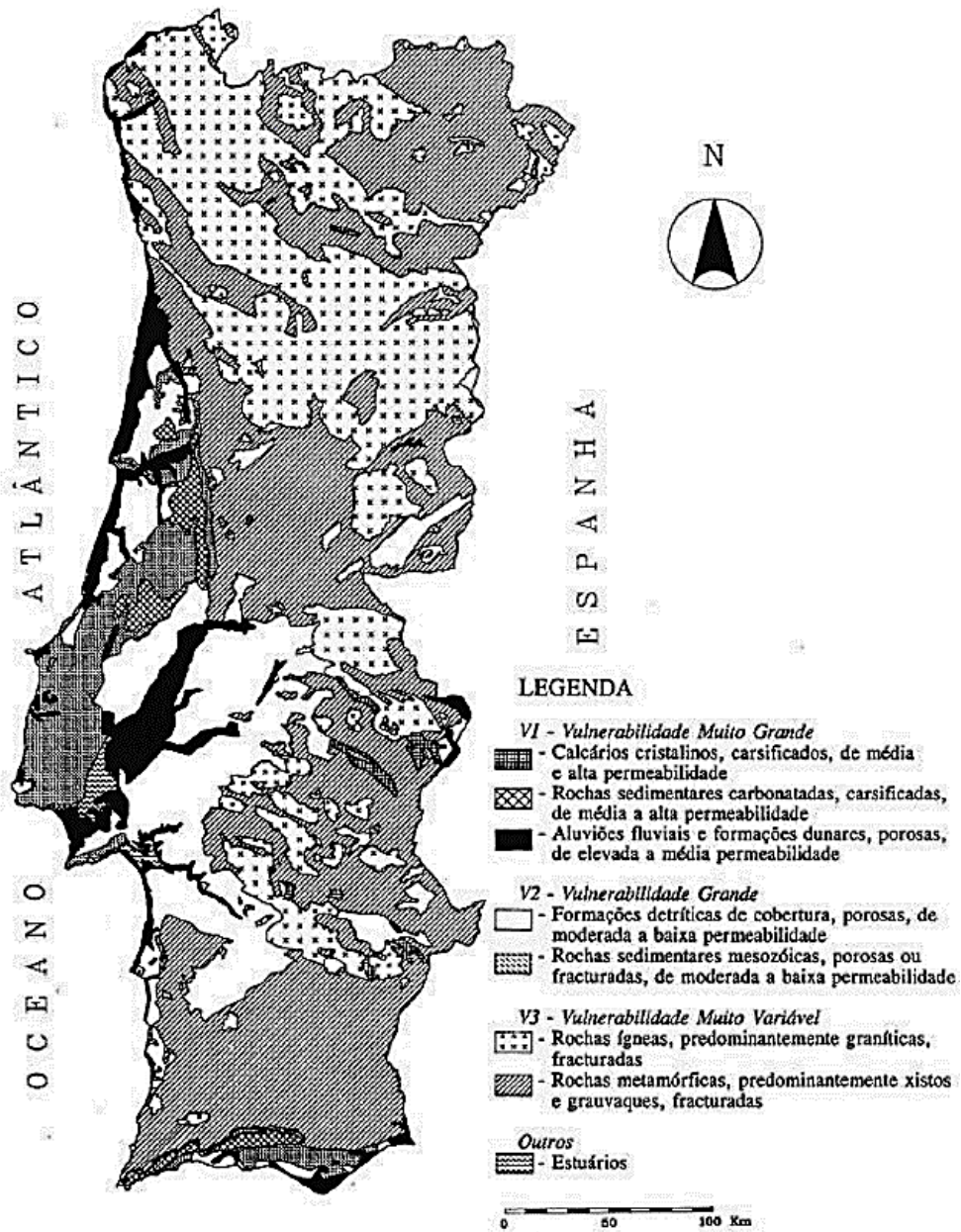


Figura 14 - Mapeamento da vulnerabilidade "clássica" à poluição das águas subterrâneas de Portugal Continental (Lobo-Ferreira e Oliveira, 1993).

### 5.3. METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Existem diferentes métodos para a elaboração de cartografia de vulnerabilidade à poluição de aquíferos, apresentando cada um deles diferentes concepções no que diz respeito à definição de vulnerabilidade. Encontram-se agrupados em diferentes categorias: métodos empíricos de indexação ou superposição, métodos determinísticos que empregam modelos de simulação baseados em processos físicos e métodos estatísticos. A selecção do método baseia-se nos objectivos do estudo e na disponibilidade de dados. A Tabela 13 resume alguns dos principais métodos para determinação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas segundo Romeiro, C. (2012).

Tabela 13 - Principais métodos para determinação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas (adaptado de Romeiro, C., 2012).

Método	Avaliação	Parâmetros	Referências
<i>Drastic Drastic Pesticide</i>	Vulnerabilidade geral	D - Profundidade do topo do aquífero R - Recarga A - Material do aquífero S - Tipo de solo T - Topografia I - Impacto no aquífero da zona não saturada C - Conductividade hidráulica	Aller et al. (1985)
IS (índice de susceptibilidade)	Vulnerabilidade geral	D - Profundidade do topo do aquífero R - Recarga A - Tipo de aquífero T - Topografia LU - Ocupação do solo	Francés et al. (2001); Paralta et al. (2001); Ribeiro (2001)
GOD	Vulnerabilidade geral	G - Ocorrência de água subterrânea O - Litologia da zona não saturada D - Profundidade da água subterrânea	Foster; Hidrata (1988)
SINTACS	Vulnerabilidade geral	S - Profundidade do topo do aquífero I - Recarga N - Impacto no aquífero da zona não saturada T - Tipo de solo A - Material do aquífero C - Conductividade hidráulica S - Topografia	Civita et al. (1990)
EPPNA	Vulnerabilidade geral	Características litológicas e Hidrogeológicas do sistema aquífero	Plano Nacional Da Água (1998); Artuso et al. (2004)
AVI	Vulnerabilidade geral	Ej - Espessura de cada camada j acima do aquífero superior Kj - Conductividade hidráulica estimada em cada camada	Van Stempvoort (1993)
Ekv	Vulnerabilidade geral	E - Profundidade da superfície freática Kv - Conductividade vertical da zona não saturada	Auge (2004)
EPIK	Vulnerabilidade geral	E - Epicarso (zona carstificada à superfície) P - Cobertura de protecção I - Condições de infiltração K - Grau de desenvolvimento da rede cársica	Doerfliger Zwahlen (1977)
VULFRAC	Vulnerabilidade geral	Espessura da zona não saturada Tipo de composição do material Densidade da zona não saturada Conectividade Abertura das fracturas	Fernandes (2003)
<i>GROUNDWATER VULNERABILITY MAP FOR NITRATE</i>	Potencial de lixiviação de nitrato	Tipo de solo Características hidráulicas Litologia do aquífero	Carter et al. (1987)
<i>LANDFILL SITE RANKING</i>	Aterros sanitários	Distância aterro/poço Gradiente de permeabilidade Capacidade de atenuação	Le Grand (1983)
<i>POLUIÇÃO DOS LENÇÓIS AQUÍFEROS</i>	Vulnerabilidade geral	Geologia (litologia e estrutura)	Taltasse et al. (1972)
<i>SITE RANKING METHODOLOGY</i>	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias. Avaliação de perigo.	Receptor-população Uso da água Uso local Degradação ambiental Caminhos Nível e tipo de contaminação Profundidade do nível de água Pluviometria Permeabilidade do solo Características do resíduo - toxicidade e persistência Prática de manuseamento - aspectos operacionais e constructivos	Kulfs et al. (1980)
<i>WASTE SOIL INTERACTION MATRIX</i>	Disposição de produtos químicos	Solo Características hidráulicas Sorção e tamponamento químico Hidrodinâmica do aquífero Ar População próxima	Hargerty et al. (1973)
<i>SURFACE IMPOUNDMENT ASSESSMENT</i>	Disposição de águas servidas	Zona não saturada Importância do recurso Qualidade de águas subterrâneas Periculosidade do material	Le Grand (1983)

O método DRASTIC associado aos SIG, é apropriado para identificar zonas mais vulneráveis à poluição, sendo o mais recomendado para a tomada de decisões quanto ao planeamento do uso e ocupação do solo. Permite ainda associar atributos (e.g. fontes de cargas contaminantes, cobertura vegetal), tornando-se fundamental para a gestão de recursos hídricos subterrâneos em especial em áreas com forte uso e ocupação industrial e urbana (LNEC, 2006).

### 5.3.1. MÉTODO DRASTIC

Em 1987, Aller e os seus coautores, apoiados pela Agência de Protecção Ambiental dos Estados Unidos, desenvolveram o método DRASTIC, cuja finalidade é estimar a vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea à poluição. Foi aplicado pela primeira vez em Portugal por Lobo-Ferreira e Oliveira (1993), a que seguiram outros trabalhos de cartografia automática da vulnerabilidade de aquíferos (Oliveira et al. 1997). No relatório LNEC 68/94, Lobo-Ferreira e Oliveira (1993), procedem à “Síntese da caracterização e do mapeamento das águas subterrâneas de Portugal” (Figura 15).

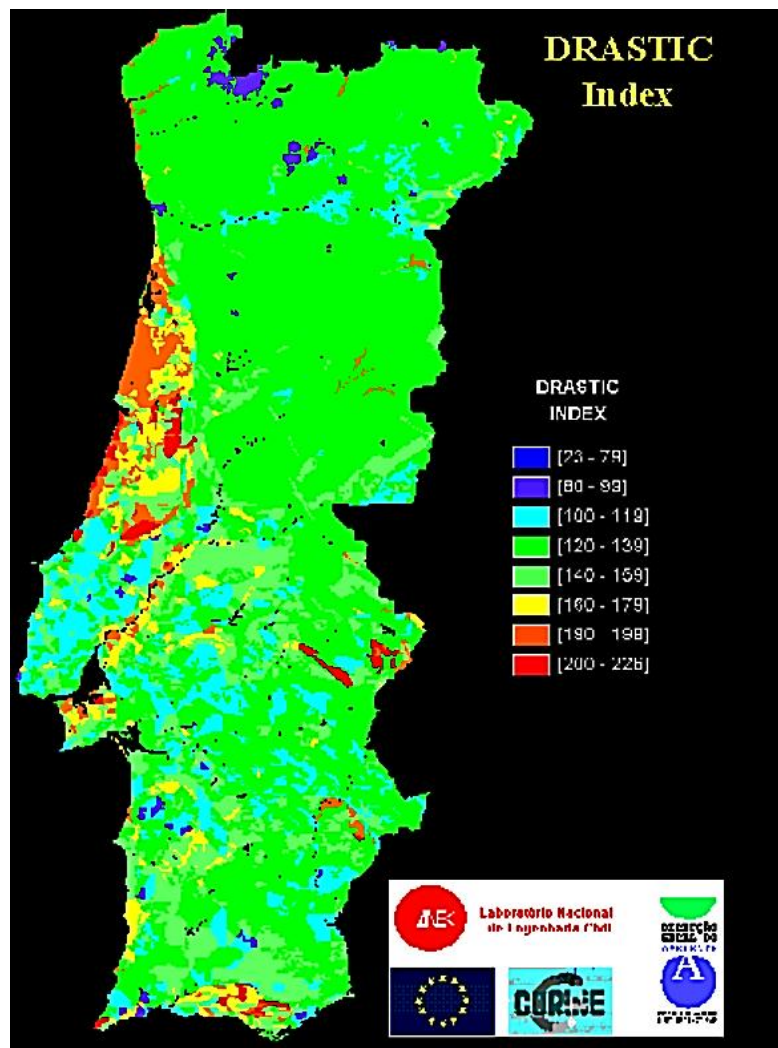


Figura 15 - Mapeamento da vulnerabilidade à poluição desenvolvido para Portugal Continental pelo método DRASTIC, à escala 1:500000 (Lobo-Ferreira e Oliveira, 1994).

O Índice DRASTIC, corresponde ao somatório ponderado de sete valores correspondentes aos seguintes parâmetros hidrogeológicos (Figura 16) (Aller et al., 1987):

- \* D – *Depth* - profundidade do topo do aquífero;
- \* R – *Recharge* - recarga do aquífero;
- \* A – *Aquífer* - tipologia do material do aquífero;
- \* S – *Soil* - tipo de solo;
- \* T – *Topography* - topografia;
- \* I – *Impact* - impacto da zona não saturada/vadosa;
- \* C – *Hydraulic Conductivity* - condutividade hidráulica do aquífero.

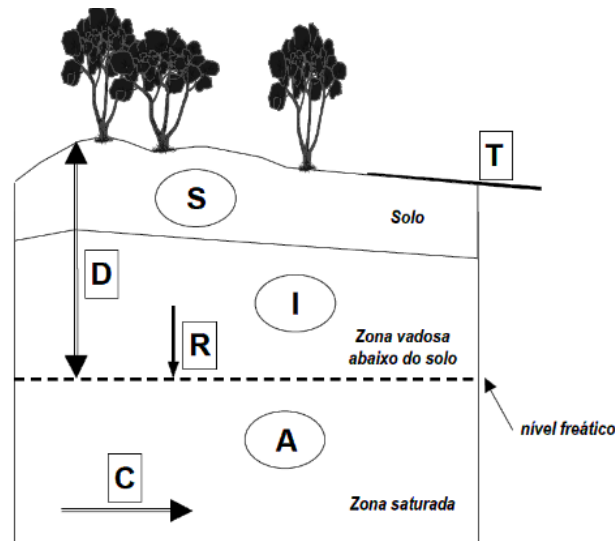


Figura 16 - Representação esquemática dos parâmetros incorporados no método DRASTIC (adaptado de Oliveira, 2002).

Os parâmetros caracterizados do meio subterrâneo e das particularidades da área de estudo, são analisados através da divisão em escalas e tipos de meios significativos que condicionam o seu potencial de poluição (Lobo-Ferreira, 1988). Cada parâmetro, é subdividido em classes representativas, ao qual é atribuído um índice (i) que pode variar entre 1 e 10 de modo a obter-se uma correspondência com as características hidrogeológicas locais (valores mais altos, correspondem a uma maior vulnerabilidade). Posteriormente, efectua-se o produto desses valores pelo peso (p) relativo de cada parâmetro. Por fim, adicionam-se os diversos produtos obtidos através da aplicação da Equação 12 (Aller et al., 1987):

$$V = Di \times Dp + Ri \times Rp + Ai \times Ap + Si \times Sp + Ti \times Tp + Ii \times Ip + Ci \times Cp \quad 12)$$

Onde: (V) corresponde à vulnerabilidade à poluição (DRASTIC), (i) é o índice atribuído ao elemento em causa e (p) é o seu peso.

O peso de cada parâmetro (Tabela 14) reflecte a sua importância relativa. O peso varia de 1 a 5 da seguinte forma:

Tabela 14 - Peso de cada parâmetro de vulnerabilidade DRASTIC (adaptado de Aller et al., 1987).

Parâmetro	D	R	A	S	T	I	C
Normal	5	4	3	2	1	5	3

O índice de vulnerabilidade DRASTIC poderá sofrer constantes actualizações face a novas caracterizações do meio, gerando mudanças na cartografia final. A Tabela 15 define a classificação da vulnerabilidade à poluição de um aquífero, de acordo com a caracterização mais estreita introduzida pelo LNEC (2011).

Tabela 15 - Valor do índice e as classes de vulnerabilidade DRASTIC (adaptado de Aller et al., 1987; LNEC, 2011).

Índice DRASTIC geral	Vulnerabilidade qualitativa
23 - 79	Praticamente Nula
80 - 99	Extremamente Baixa
100 - 119	Muito Baixa
120 - 139	Baixa
140 - 159	Média
160 - 179	Alta
180 - 199	Muito Alta
200 - 226	Extremamente Alta

No entanto, para que seja possível aplicar o método DRASTIC, é necessário estarem reunidas as seguintes condições: o contaminante deve ter origem na superfície, a sua introdução no aquífero processa-se por infiltração, o contaminante tem que possuir a mesma mobilidade que a água e a zona de estudo terá de abranger uma área superior a 40,5 Hectares.

### 5.3.1.1. CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS

#### 5.3.1.1.1. PARÂMETRO D - PROFUNDIDADE DO TOPO DO AQUÍFERO

É a profundidade entre a superfície do solo e o lençol freático (Tabela 16) (Aller et al., 1987). Quanto maior for a profundidade, maior será o tempo de filtragem, assim como o tempo de exposição do contaminante aos agentes oxidantes e adsorventes presentes na zona não saturada, sendo o índice de vulnerabilidade associado mais baixo (Matias, 2010).

Tabela 16 - Classes e índices da profundidade da zona não saturada (adaptado de Aller et al., 1987).

Parâmetro	Classes	Índice
D- Profundidade da zona não saturada (m) (p=5)	< 1,50	10
	1,50 - 4,6	9
	4,6- 9,1	7
	9,1 - 15,2	5
	15,2 - 22,9	3
	22,9 - 30,5	2
	> 30,5	1

### 5.3.1.1.2. PARÂMETRO R - RECARGA DO AQUÍFERO

Este parâmetro está relacionado com a quantidade de água que se infiltra no solo e atinge o aquífero, sendo responsável pelo transporte de contaminantes, tanto verticalmente através da zona não saturada, como sub-horizontalmente no interior do aquífero. Quanto maior for a recarga (Tabela 17), maior será o potencial de poluição (Paralta et al., 2001). Este parâmetro tem em consideração os valores médios anuais de infiltração, de acordo com a intensidade, distribuição ou duração dos eventos que originam a recarga. (Al-Zabet, 2002).

Tabela 17 - Classes e índices de recarga do aquífero (adaptado de Aller et al., 1987).

Parâmetro	Classes	Índice
R - Recarga do aquífero (mm/ano) (p=4)	0 - 51	1
	51 - 102	3
	102 - 178	6
	178 - 254	8
	> 254	9

### 5.3.1.1.3. PARÂMETRO A – TIPOLOGIA DO MATERIAL DO AQUÍFERO

Este parâmetro representa a capacidade de atenuação do aquífero em função do material litológico que o constitui (Paralta et al., 2001). Está estritamente relacionado com as características geotécnicas (e.g. porosidade, tamanho dos poros, linearidade do fluxo) (Sinan & Razak, 2008). As formações litológicas mais permeáveis apresentam índices de vulnerabilidade mais elevados (Tabela 18), uma vez que permitem um escoamento da água no interior da zona saturada mais acelerado (Matias, 2010).

Tabela 18 - Classes e índices do material do aquífero (adaptado de Aller et al., 1987).

Parâmetro	Classes	Índice
A - Material do aquífero (p=3)	Xisto argiloso, argilito	1 - 3 (2)
	Rocha metamórfica/ígnea	2 - 5 (3)
	Rochas metamórfica/ígnea alterada	3 - 5 (4)
	Arenito, calcário e argilito estratificados	5 - 9 (6)
	Arenito maciço	4 - 9 (6)
	Calcário maciço	4 - 9 (6)
	Areia e balastro	4 - 9 (8)
	Basalto	2 - 10 (9)
	Calcário carsificado	9 - 10 (10)

Cada material possui um intervalo de valores, apresentando-se entre parêntesis o índice típico a atribuir. A escolha do índice a atribuir deve basear-se em informação específica sobre o material do aquífero. Se esta informação não existir, deve-se utilizar o índice típico.

### 5.3.1.1.4. PARÂMETRO S - TIPO DE SOLO

Este parâmetro, avalia a capacidade de cada tipo de solo (Tabela 19) de atenuar o potencial de poluição. É necessário deter conhecimento das características do solo que condicionam esse potencial, tais como: a espessura, a textura, a expansibilidade/contractibilidade e o teor em matéria orgânica (Aller et al., 1987). Considera-se o material da zona alterada da superfície terrestre, com uma espessura normalmente inferior a 2m.

Tabela 19 - Classes e índices do tipo de solo (adaptado de Aller et al., 1987).

Parâmetro	Classes	Índice
S - Tipo de Solo (p=2)	Fino ou ausente	10
	Balastro	10
	Areia	9
	Turfa	8
	Argila agregada e/ou expansível	7
	Franco arenoso	6
	Franco	5
	Franco siltoso	4
	Franco argiloso	3
	Lodo	2
	Argila não agregada e não expansível	1

### 5.3.1.1.5. PARÂMETRO T – TOPOGRAFIA

A topografia está relacionada com o declive do terreno (Tabela 20). O declive condiciona o escoamento superficial, assim como revela as zonas planas, onde um poluente pode permanecer à superfície durante tempo suficiente para se infiltrar (Aller et al., 1987).

Tabela 20 - Classes e índices da topografia (adaptado de Aller et al., 1987).

Parâmetro	Classes	Índice
T - Topografia (%) (p=1)	< 2	10
	2 - 6	9
	6 - 12	5
	12 - 18	3
	> 18	1

### 5.3.1.1.6. PARÂMETRO I – IMPACTO DA ZONA NÃO SATURADA/VADOSA

Este parâmetro, relaciona a litologia (Tabela 21) com o tempo de contacto com o poluente, permitindo a ocorrência de diversos processos: biodegradação, neutralização, filtração mecânica, reacção química, volatilização e dispersão. Uma vez que a fracturação facilita a percolação vertical do poluente até ao aquífero, é particularmente importante considerá-la (Aller et al., 1987).

Tabela 21 - Classes e índices da influência da zona não saturada (adaptado de Aller et al., 1987).

Parâmetro	Classes	Índice
I - Influência da zona não saturada (p=5)	Camada confinante	1
	Argila/Silte	2 - 6 (3)
	Xisto argiloso, argilito	2 - 5 (3)
	Calcário	2 - 7 (6)
	Arenito	4 - 8 (6)
	Arenito, calcário e argilito estratificados	4 - 8 (6)
	Areia e balastro com % significativa de silte e argila	4 - 8 (6)
	Rocha metamórfica/Ígnea	2 - 8 (4)
	Areia e balastro	6 - 9 (8)
	Basalto	2 - 10 (9)
	Calcário carsificado	8 - 10 (10)

Cada material tem um intervalo de valores, apresentando-se entre parêntesis o índice típico a atribui. A escolha do índice a atribuir deve basear-se em informação específica sobre o material da zona não saturada. Se esta informação não existir, deve utilizar-se o índice típico.

### 5.3.1.1.7. PARÂMETRO C – CONDUCTIVIDADE HIDRÁULICA DO AQUÍFERO

Este parâmetro refere-se à capacidade do aquífero para transmitir água, que em conjunto com o gradiente hidráulico controlam o fluxo de água subterrânea (Tabela 22). A conductividade hidráulica está relacionada com a quantidade e conectividade dos espaços vazios dentro do aquífero, que podem ser poros, fracturas/fissuras, cavidades ou planos de estratificação (Aller et al., 1987).

Tabela 22 - Classes e índices de conductividade hidráulica (adaptado de Aller et al., 1987).

Parâmetro	Classes	Índice
C - Conductividade hidráulica do Aquífero (m/d) (p=3)	< 4,1	1
	4,1 - 12,2	2
	12,2 - 28,5	4
	28,5 - 40,7	6
	40,7 - 81,5	8
	> 81,5	10

### 5.3.2. CAPACIDADE DEPURATIVA DO SOLO

O solo e subsolo possuem uma capacidade depurativa de atenuação de contaminantes e/ou seus efeitos, sendo possível quantificar esta capacidade. Um dos métodos que possibilita avaliar de forma quantitativa o poder depurador é o método de Rehse, no entanto é particularmente direccionado para meios porosos e isotrópicos. De acordo com Moinante (2003), a modificação de Bolsenkötter para meios cársicos e/ou fissurados é semelhante (Tabela 23), no entanto o poder depurador é inferior sendo necessária uma maior distância para que ocorra a depuração total. O índice de depuração para zonas saturadas é calculado pela Equação 13:

$$IR = \frac{0,5}{H} \quad 13)$$

Onde: (IR) é o índice de depuração na zona não saturada e (H) é a espessura vertical da zona não saturada.

Tabela 23 - Poder depurador das rochas carbonatadas e fissuradas (adaptado de Moinante, 2003).

M	Material	H (m)	IR = 0,5/H
1	Marga	10	0,05
2	Arenito com intercalações argilosas, argilas, micaxisto e filito	20	0,03
3	Basalto e rochas vulcânicas	30	0,02
4	Grauvaque, arcose, arenito argiloso, arenito siltoso	50	0,01
5	Granito, granodiorito, diorito, sienito	70	0,01
6	Quartzitos, arenitos com sílex	100	0,01
7	Calcário	200	0

### 5.3.3. POTENCIAL DE ESCOAMENTO DOS SOLOS

O potencial de escoamento dos solos (Tabela 24) refere-se à capacidade destes, favorecerem a drenagem pluvial, tendo em conta a natureza geológica dos mesmos, bem como o declive. Quanto maior for o potencial de escoamento de um solo, mais baixa é a sua capacidade de infiltração das águas pluviais.

Tabela 24 - Classificação dos Grupos Hidrológicos dos Solos, características e capacidade de infiltração correspondentes (Lombardi Neto et al., 1991).

Tipo	Características	Capacidade (mm h <sup>-1</sup> )
A	Solos arenosos e argilosos, profundos e bem drenados	> 3,4
B	Solos arenosos, com pouca argila e orgânico	2,5 e 3,4
C	Solos mais argilosos que o Tipo B, com baixa permeabilidade	1,4 e 2,5
D	Solos com pouca argila, rasos, pouco desenvolvidos e muito impermeáveis	< 1,4

O potencial de escoamento de solos está directamente relacionado com o tipo de solo. A DGADR - Direcção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural, estabeleceu grupos de solos para Portugal, tais como: solos incipientes, solos calcários, barros, solos argilosos pouco saturados, solos podzolizados, solos halomórficos, solos hidromórficos e solos orgânicos hidromórficos. Para cada tipo de solo é possível definir o respectivo potencial hidrológico.

#### 5.3.4. DECLIVE

O declive está directamente associado ao potencial de escoamento do solo, bem como à capacidade de infiltração. Traduz a inclinação do terreno, normalmente expressa em percentagem, sendo que quanto maior for o declive, maior será o potencial de escoamento do solo e conseqüentemente menor a facilidade de infiltração das águas no solo.

#### 5.3.5. QUANTIDADE MÁXIMA DE ÁGUA ARMAZENÁVEL NO SOLO

A quantidade máxima de água armazenável no solo disponível aos processos de evapotranspiração, depende da quantidade de água armazenável no solo. Já quanto maior for a evapotranspiração, menor será a infiltração de água em profundidade. Sendo a quantidade máxima de água armazenável no solo proporcional à profundidade máxima do solo, coincide com a profundidade atingida pelas raízes das plantas e indica a capacidade de solo utilizável. O geoprocessamento destes parâmetros em ambiente SIG, poderá indicar as possíveis zonas de recarga directa.

## 6. CRITÉRIOS E METODOLOGIA NA DELIMITAÇÃO DE PERÍMETROS DE PROTECÇÃO EM CAPTAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

### 6.1. CRITÉRIOS DE DELIMITAÇÃO DE PERÍMETROS DE PROTECÇÃO

O perímetro de protecção de captações deve ter em conta aspectos relacionados com as características técnicas da captação, com a massa de água captada e o espaço físico envolvente, assim como as características geológicas e hidrogeológicas do aquífero. Para a captação, devem ainda ser definidos os objectivos, os usos, os volumes e os caudais de exploração e considerados os aspectos económicos e sociais da região e a legislação

aplicável. Os critérios a utilizar na delimitação dos perímetros de protecção consistem na combinação de aspectos técnicos ou outros, de ordem legal ou administrativa, relacionados na maioria das vezes com a ocupação do solo. Destacam-se alguns critérios para a delimitação de um perímetro de protecção:

- \* **Distância:** delimitação simples de uma área definida por um círculo ou quadrado, cujo centro é a própria captação. É o critério mais simples e rápido, mas não incorpora o fluxo de água subterrânea nem os processos relacionados com o transporte de poluentes. Pode ser por isso considerado o critério menos eficaz, do qual resulta um baixo nível de protecção. É muitas vezes utilizado apenas na fase preliminar de estudos deste tipo (Lobo-Ferreira et al., 2009);
- \* **Rebaixamento:** devido à extracção de água, a direcção do fluxo e a velocidade de chegada da água à captação sofrem perturbações, o que pode ocasionar ou acelerar a propagação de poluentes em direcção à mesma. É necessário ter em consideração a zona de influência e as contaminações produzidas fora dessa zona, mas dentro da área de recarga, podendo alcançar a captação (Laureano, 2012);
- \* **Tempo de propagação:** indica o tempo que a água subterrânea e/ou um poluente leva até atingir a captação, partindo de um ponto no interior da zona de contribuição. A Legislação Portuguesa através do Decreto-Lei n.º 382/99 e para captações de água subterrâneas para abastecimento público, especifica o tempo de percurso em 50 dias para a zona de protecção intermédia e em 3500 dias para a zona de protecção alargada.
- \* **Hidrogeológicos/Fronteiras de fluxo:** define a área geográfica que contribui com água subterrânea para a captação e pode ser utilizada como zona de protecção. É definida com base nas divisórias hidrogeológicas e/ou em outras entidades físicas e hidrogeológicas, controladoras do fluxo de água subterrânea (Lobo-Ferreira et al., 2009). Normalmente conduzem a áreas sobredimensionadas, logo devem ser analisados outros critérios, de modo a restringir ou a modificar os seus resultados (e.g. aquíferos fracturados);
- \* **Poder auto-depurador do terreno/capacidade de assimilação:** capacidade do aquífero para imobilizar ou atenuar a concentração de poluentes que atravessam a secção não saturada, antes de alcançar a captação (Laureano, 2012). É possível determinar a extensão de terreno que o poluente terá de atravessar, até alcançar concentrações aceitáveis para o consumo humano.

#### 6.1.1. SELECÇÃO DO CRITÉRIO A APLICAR

Os objectivos que se pretendem alcançar com o traçado do perímetro de protecção, assim como as características hidrogeológicas da captação em estudo, estabelecem as considerações técnicas a aplicar (Tabela 25).

Tabela 25 - Relação entre critérios no traçado de perímetros de protecção e seus objectivos (adaptado de ITGE, 1991).

Critérios	Objectivos
Distância de rebaixamento	Evita variações no fluxo que possam provocar a chegada de substâncias indesejáveis à captação.
Poder auto-depurador do terreno/Tempo de propagação/Distância	Assegura que a contaminação é imobilizada ou atenuada para concentrações aceitáveis no trajecto até à captação.
Tempo de propagação	Assegura um tempo de reacção que permite recorrer a fontes alternativas de abastecimento, até que o efeito de contaminação se reduza para níveis aceitáveis.
Critérios hidrogeológicos	Garante a qualidade das águas subterrâneas em toda a área de contribuição da captação.

As considerações técnicas podem relacionar-se com a maior ou menor facilidade de aplicação ou quantificação de determinado critério no qual se baseia o grau de adaptabilidade a alterações, facilidade de verificação no local, concordância com o modelo hidrogeológico ou a capacidade de incorporação de processos físicos que afectem o controlo do transporte de poluentes (Tabela 26).

Tabela 26 - Valorização dos critérios utilizados na delimitação dos perímetros de protecção em função de considerações técnicas (adaptado EPA, 1987).

Considerações técnicas	Critérios				
	Distância	Rebaixamento	Tempo de propagação	Critérios hidrogeológicos	Poder auto-depurador do terreno
Facilidade de aplicação	Alto	Médio	Médio	Médio	Baixo
Facilidade de classificação	Alto	Alto	Médio	Não se aplica	Baixo
Facilidade de adaptação a mudanças	Alto	Baixo	Baixo	Alto	Alto
Facilidade de verificação	Alto	Alto	Baixo	Alto	Baixo
Capacidade de considerar o poder auto-depurador do terreno	Não se aplica	Não se aplica	Médio	Não se aplica	Não se aplica
Concordância com o modelo hidrogeológico	Baixo	Alto	Alto	Não se aplica	Não se aplica
Capacidade de considerar processos físicos	Baixo	Baixo	Alto	Médio	Médio
Classificação de 1 a 5	1	2	5	3	3

## 6.2. METODOLOGIA NA DELIMITAÇÃO DE PERÍMETROS DE PROTECÇÃO

Existe uma variedade de técnicas para determinar os perímetros de protecção, que vão desde métodos simples até muito complexos (Foster et al., 2002). Encontram-se agrupados em três tipos de métodos, tais como: métodos geométricos (atribuição de um raio), métodos analíticos e numéricos simplificados (apoiados em modelos hidrogeológicos conceptuais que permitem definir um raio ou polígono de protecção) e métodos numéricos (baseados em modelos numéricos de sistemas hidrogeológicos, cartografia hidrogeológica detalhada do local, ensaios hidráulicos e caracterização hidrogeoquímica).

## 6.2.1. MÉTODOS GEOMÉTRICOS

### 6.2.1.1. MÉTODO DO RAIOS FIXO ARBITRÁRIO

Trata-se do método mais simples e baseia-se na delimitação de uma área circular, centrada no ponto de captação de raio escolhido arbitrariamente. É usado para determinar uma área de protecção provisória, até se estabelecer o processo a ser utilizado, ou até se efectivarem estudos mais detalhados sobre a região (ITGE, 1991).

### 6.2.2. MÉTODOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS SIMPLIFICADOS

Estes métodos permitem calcular as dimensões das zonas de protecção, recorrendo a simples equações e a parâmetros hidrogeológicos, tais como: transmissividade, porosidade, gradiente hidráulico, condutividade hidráulica, caudal de extracção e espessura saturada do aquífero. O cálculo do perímetro de protecção baseia-se na direcção do fluxo da água subterrânea e os cálculos podem ser mediante o tempo de propagação ou de rebaixamento. Apesar de serem os mais utilizados, pois possibilitam a comparação com outros métodos, consideram as características do aquífero de forma uniforme e não têm em consideração a existência de fronteiras hidrogeológicas, heterogeneidades no aquífero e a recarga do mesmo (EPA, 1994).

#### 6.2.2.1. MÉTODO BASEADO NA LEI DE DARCY

A lei de Darcy relaciona a velocidade linear de escoamento no aquífero poroso com o gradiente e a condutividade hidráulica (Equação 14). Permite calcular o tempo de propagação de um poluente, desde o momento da infiltração até alcançar a zona de extracção ou a captação (EPA, 1994).

$$v = \frac{Q}{A} = K \cdot i \quad 14)$$

Onde:  $v$  - velocidade linear média ou velocidade real de escoamento (m/d);  $Q$  - caudal médio (m<sup>3</sup>/d) que atravessa uma secção de área  $A$  (m<sup>2</sup>) perpendicular ao gradiente hidráulico;  $K$  - condutividade hidráulica horizontal (m/d);  $i$  - gradiente hidráulico horizontal.

Uma vez calculada a velocidade média, pode obter-se o tempo de propagação ao longo de uma determinada distância através da Equação 15:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{d \cdot n}{K \cdot i} \quad 15)$$

Em que:  $t$  - tempo de propagação (d) e  $d$  - distância percorrida (m).

Pode ainda ser calculada a distância aos limites que definem o tempo de propagação, recorrendo à Equação 16:

$$d = v \cdot t = \frac{K \cdot i \cdot t}{n} \quad 16)$$

Onde:  $d$  - distância da captação ao limite a proteger em relação ao tempo de propagação considerado necessário (m).

Esta equação é válida para meios porosos homogêneos, isotrópicos e fluxo laminar. Não é adequada para meios fissurados ou carstificados, a não ser no caso dos aquíferos fracturados, em que a densidade de fracturação permita aproximações ao meio poroso.

#### 6.2.2.2. MÉTODO DO RAIOS FIXO CALCULADO

Método adequado para aquíferos confinados, onde o perímetro de protecção é delimitado a partir de uma equação volumétrica, que pode utilizar o tempo de propagação do poluente até à captação ou o rebaixamento do nível piezométrico. Relativamente ao tempo de propagação, a equação possibilita o cálculo do raio de uma secção cilíndrica do aquífero, com centro no ponto de captação e com capacidade de contenção do volume de água captada durante um determinado tempo de propagação (Figura 17). Este tempo é essencial para que o efeito de um potencial poluente seja reduzido até apresentar concentrações seguras, antes de alcançar a captação. (Moinante, 2004).

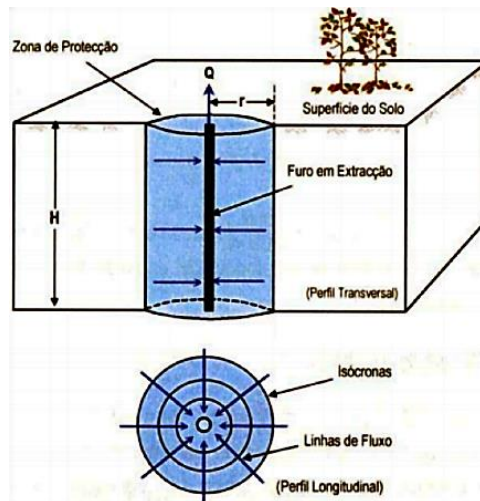


Figura 17 - Definição de perímetro de protecção utilizando o método do raio fixo calculado (Adaptada de EPA, 1994; Moinante, 2003).

Admite ainda, que a captação é a única a drenar o aquífero e que não existem direcções preferenciais para o fluxo, com todas as linhas de corrente a convergirem para a captação. O único parâmetro hidrogeológico aplicado segundo a equação volumétrica (Equação 17) é a porosidade eficaz:

$$Q \cdot t = n \cdot \pi \cdot H \cdot r^2 \Leftrightarrow r = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{n \cdot H \cdot \pi}} \quad (17)$$

Em que: Q - caudal de exploração da captação (m<sup>3</sup>/d); t - tempo de propagação (d); n - porosidade eficaz do aquífero (%); H - espessura saturada da captação (m) e r - raio do perímetro de protecção (m).

Recorrendo ao rebaixamento do nível piezométrico, obtêm-se geralmente melhores resultados quando se arbitram os factores condicionantes da realidade física, relacionados com as seguintes condições (ITGE, 1991): o aquífero é homogêneo e isotrópico em relação à permeabilidade e infinito em toda a sua extensão, a captação tem diâmetro igual a zero e

atravessa completamente o aquífero, ausência de recargas anteriores, a superfície piezométrica regional é praticamente plana, a água captada é radial em torno da captação e o caudal de extracção é constante. A equação utilizada na aplicação deste método é a Equação de Theis para regime variável (equação 18):

$$d = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} \cdot du \quad (18)$$

Em que u é uma equação auxiliar relacionada com a função do poço, W(u), e possui o significado seguinte (Equação 19):

$$u = \frac{r^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t} = \sqrt{\frac{u \cdot 4 \cdot T \cdot t}{S}} \quad (19)$$

Onde: r – raio da zona de protecção (m); Q – caudal de extracção constante (m<sup>3</sup>/d); T – transmissividade do aquífero (m<sup>2</sup>/d); S – coeficiente de armazenamento do aquífero; t – tempo decorrido desde o início da extracção (d).

A função do poço, W(u), não tem solução analítica, sendo resolvida por aproximação (Equação 20):

$$W(u) = \frac{4\pi T s}{Q} \quad (20)$$

Onde (s) é o rebaixamento no ponto localizado a uma distância r da captação (m).

A utilização do raio fixo calculado é um processo relativamente simples e pouco dispendioso. Embora não considere todos os parâmetros hidrogeológicos, na maioria das vezes conduz a uma área superior à dos restantes métodos. Segundo o Decreto-Lei n.º 382/99, este método aplica-se a todo o tipo de aquíferos, de acordo com a Tabela 27 (ANEXO I).

Tabela 27 - Zonas de protecção para os vários tipos de aquífero (Decreto-Lei 382/99).

Tipo de Sistema aquífero	Zona de protecção imediata	Zona de protecção intermédia	Zona de protecção alargada
Tipo 1	r = 20m	r é o maior valor entre 40 m e r <sub>1</sub> (t=50dias)	r é o maior valor entre 350 m e r <sub>1</sub> (t=3500dias)
Tipo 2	r = 40m	r é o maior valor entre 60 m e r <sub>2</sub> (t=50dias)	r é o maior valor entre 500 m e r <sub>2</sub> (t=3500dias)
Tipo 3	r = 30m	r é o maior valor entre 50 m e r <sub>3</sub> (t=50dias)	r é o maior valor entre 400 m e r <sub>3</sub> (t=3500dias)
Tipo 4	r = 60m	r é o maior valor entre 280 m e r <sub>4</sub> (t=50dias)	r é o maior valor entre 2400 m e r <sub>4</sub> (t=3500dias)
Tipo 5	r = 60m	r é o maior valor entre 140 m e r <sub>5</sub> (t=50dias)	r é o maior valor entre 1200 m e r <sub>5</sub> (t=3500dias)
Tipo 6	r = 40m	r é o maior valor entre 60 m e r <sub>6</sub> (t=50dias)	r é o maior valor entre 500 m e r <sub>6</sub> (t=3500dias)

Tipo 1 – sistema aquífero confinado cujo suporte litológico é constituído por formações porosas; Tipo 2 – sistema aquífero livre cujo suporte litológico é constituído por formações porosas; Tipo 3 – sistema aquífero semi-confinado cujo suporte litológico é constituído por formações porosas; Tipo 4 – sistema aquífero cujo suporte litológico é constituído por formações carbonatadas; Tipo 5 - sistema aquífero cujo suporte litológico é constituído por formações ígneas e metamórficas fissuradas; Tipo 6 - sistema aquífero cujo suporte litológico é constituído por formações ígneas e metamórficas pouco fissuradas e/ou alteradas.

### 6.2.2.3. MÉTODO DE KRIJGSMAN E LOBO-FERREIRA

Considera o gradiente hidráulico e incide particularmente na zona de protecção intermédia definida na legislação portuguesa, cuja dimensão corresponde a um tempo de propagação de 50 dias, com um valor entre 40 e 280 metros, de acordo com o tipo de aquífero. Segundo Krijgsman e Lobo-Ferreira (2001), são três as equações que permitem o cálculo das três dimensões da zona de protecção intermédia de uma captação:

- I. Distância de protecção a montante da captação (Equação 21, 22 e 23)

$$r_{\text{máx}} = \frac{(0,00002x^5 - 0,0009x^4 + 0,015x^3 + 0,37x^2 + x)}{F} \quad 21)$$

Onde:

$$x = 2 \cdot k \cdot i = \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot n}} \quad 22)$$

$$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot b \cdot i}{Q} \quad 23)$$

Em que: k – condutividade hidráulica (m/d); i – gradiente hidráulico; b – espessura do aquífero (m); Q – caudal de extracção (m<sup>3</sup>/d); n – porosidade eficaz; t – tempo de propagação (d). Não devem ser utilizados parâmetros que conduzam a valores de x superiores a 18.

- II. Distância de protecção a jusante da captação (Equação 24)

$$r_{\text{mín}} = \frac{(-0,042x^3 + 0,37x^2 - 1,04x)}{F} \quad 24)$$

Quando x for < - 3,5 deve aplicar-se uma distância mínima de protecção igual a 25 m como medida de segurança, uma vez que se torna muito arriscado aplicar distâncias de protecção muito pequenas; a equação não deve ser aplicada no caso de valores de n < 0,1 (10 %).

- III. Distância de protecção na perpendicular à direcção do fluxo (Equação 25)

$$r_p = 4 \cdot \sqrt{\frac{Q}{n \cdot b}} \quad 25)$$

Se  $r_{\text{máx}}$  for superior a quatro vezes mais o  $r_{\text{mín}}$ , o erro de cálculo pode ser superior a 15%, no entanto apenas conduz a uma sobreprotecção, não devendo ser considerada uma limitação (Krijgsman e Lobo-Ferreira, 2001).

Segundo Moinante (2003), a sua aplicação exige determinadas condicionantes, tais como: aquífero livre uniforme com base impermeável; ausência de anisotropias e heterogeneidades; inexistência de fracturas e de trajectos preferenciais; valores constantes de K horizontal, espessura, porosidade e caudal de extracção; k vertical = 0,1 x k horizontal; fluxo e gradientes uniformes; existência de ralos em toda a espessura do aquífero; ausência de recarga; inexistência de interferências de outras captações; zona de protecção simétrica.

Outros métodos para delimitação de perímetros de protecção estão citados em Moinante (2003), tais como: método do fluxo entre aquíferos, sempre que exista uma camada entre dois aquíferos; método da equação do fluxo uniforme, quando a superfície piezométrica é inclinada; método da equação de equilíbrio de Thiem, que pressupõe que a superfície piezométrica regional é praticamente plana, o aquífero é homogéneo, isotrópico e também infinito na sua extensão; método da equação de Hoffman e Lillich, aplicável a meios homogéneos e onde se verifique um rebaixamento reduzido em relação à espessura do aquífero; método de Wyssling, utilizado em aquíferos porosos homogéneos com superfícies piezométricas inclinadas; método das formas variadas simplificadas, aplicado em aquíferos homogéneos e sem fronteiras hidrogeológicas (Moinante, 2003).

### 6.2.3. MÉTODOS GRÁFICOS

No método de Albinet, os círculos de rebaixamento resultantes, intersectam as isopiezas<sup>10</sup> anteriores às extrações, e nos pontos de intersecção são calculados os valores modificados de carga hidráulica (Moinante, 2003). Segundo a mesma autora, o método de Jacobs e Bear é aplicável em casos onde existe uma única captação, o aquífero é homogéneo e isotrópico, de extensão infinita, e submetido a um gradiente regional uniforme.

O método de Sauty, é exclusivo para aquíferos homogéneos, isotrópicos, de extensão semi-infinita situados próximo de um curso de água que proporciona alimentação natural (Moinante, 2003).

O método dos nomogramas de Van Weageningh e Van Duijnenboden, é aplicado sob a forma de nomogramas de forma a obter o tamanho das zonas de protecção, no entanto é necessário conhecer alguns parâmetros (e.g. porosidade eficaz, caudal bombeado, espessura do aquífero).

### 6.2.4. MÉTODOS NUMÉRICOS

As equações diferenciais do fluxo subterrâneo são resolvidas utilizando técnicas de aproximação numérica obtidas através de discretização<sup>11</sup> do aquífero e da solução de um sistema de equações com incógnitas obtidas da mesma forma (Feitosa, 1997). Possuem elevada flexibilidade de aplicação e modelação, apresentando resultados com alta exactidão. Exigem uma extensa quantidade de informação, tornando a sua utilização uma tarefa complexa com elevados custos associados (ITGE, 1991).

---

<sup>10</sup> Linhas que unem pontos de igual piezometria.

<sup>11</sup> Processo onde se estabelece uma malha sobre o sistema de água subterrânea em estudo, onde um conjunto de valores e parâmetros é atribuído em cada nó, escolhido aleatoriamente (como por exemplo, nível freático ou piezométrico, condutividade hidráulica, espessura do aquífero). A malha constitui a base de uma matriz de equações a serem resolvidas (Moinante, 2003).

Na determinação dos perímetros de protecção, recorre-se ao modelo numérico de transporte, que utiliza os valores de piezometria obtidos no modelo de fluxo, permitindo definir o trajecto das partículas lançadas num determinado ponto (Moinante, 2003; Lobo-Ferreira et al., 2009). No entanto, a utilização deste modelo justifica-se apenas nos casos em que existe informação suficiente, que suporte as necessidades de dados do programa (Moinante, 2003). Entre os métodos numéricos mais utilizados, destaca-se o método das diferenças finitas, onde a região é aproximada por uma malha rectangular ou quadrada e os valores médios da piezometria são determinados nos pontos centrais da malha. É gerada assim uma equação para cada célula até que o equilíbrio seja alcançado (Feitosa, 2003).

Já a aplicação do método do rastreio de partículas (*Particle Tracking Method*), segundo Mendonça (2005), permite a delimitação de perímetros de protecção de captações de água subterrânea em aquíferos com condições de fronteira, de homogeneidade e de anisotropia complexas. Estas técnicas são frequentemente utilizadas em Portugal (Feseker & Lobo-Ferreira, 2001; Marques, 2002).

No método da sobreposição dos gradientes, considera-se o movimento advectivo dos poluentes. Aplica-se em aquíferos confinados, homogéneos e isotrópicos e com gradiente hidráulico constante. Não está dependente do número de furos, mas específica a extracção de um caudal constante. Permite calcular as dimensões das zonas de protecção segundo a direcção a montante e a jusante do furo, na perpendicular, o ponto neutro ou de estagnação a jusante do furo e a largura máxima da chamada.

#### 6.2.5. OUTROS MÉTODOS

Existe ainda o método de Horsley, que analisa os rebaixamentos dos níveis piezométricos à medida que se afastam da captação. No caso da delimitação de perímetros de protecção com traçadores, averigua-se se um poluente poderá atingir, ou não, a captação a estudar, e se tal se verificar, quanto tempo demorará para que isso aconteça. Os traçadores utilizados podem ser naturais (e.g. trítio) ou artificiais (Moinante, 2003).

#### 6.3. SELECÇÃO DO MÉTODO A APLICAR

A escolha do método baseia-se com a quantidade de dados disponíveis, com as questões técnicas, económicas e políticas. A Tabela 28 resume os diferentes métodos a aplicar na delimitação de perímetros de protecção de acordo com os critérios em diferentes meios.

Tabela 28 - Critério empregue nos diferentes métodos de delimitação de perímetros de protecção (adaptado de EPA, 1987).

Método		Critério					Tipo de Materiais	
		D	R	t	h	a-d	Porosos	Cársicos e Fissurados
Geométricos	Raio fixo arbitrário		x					x
	Lei de Darcy	Função tempo		x				x
Função Rebaixamento			x				x	
	Raio fixo calculado	Função tempo		x				x
		Função Rebaixamento			x			x
Analíticos	Kreitle e Senger				x	x		x
	Fluxo entre Aquíferos					x		x
	Fluxo Uniforme			x	x			x
	Equação Equilíbrio Thiem			x				x
	Hoffman e Lillich			x	x			x
	Wyssling			x	x			x
	Formas variadas simplificadas			x	x			x
	Krijgsman e Lobo-Ferreira		x					x
	Albinet			x				x
	Gráficos	Tempo de propagação - ábaco	Sauty e Tyre			x		
Jacobs e Bear					x			x
Nomogramas de VW e VD				x			x	
Nomogramas de Pettyjon				x			x	
Numéricos	Diferenças Finitas			x				x
	Rastreio de partículas				x	x		x
	Sobreposição de gradientes			x	x			x
	Modelos de fluxo e transporte			x	x	x		x
Hidrogeológicos	Hidrogeológicos					x		x
Outros	Renise						x	
	Horsley		x	x				x
	Traçadores				x	x	x	x
	Trítio				x		x	x

D – distância; R – rebaixamento; t – tempo de propagação; h – critérios hidrogeológicos; a-d – poder auto-depurador.

As considerações técnicas estão sempre relacionadas com a facilidade de aplicar a metodologia definida com base na quantidade e tipo de dados obtidos e meios informáticos disponíveis. Sobre as considerações económicas recai a importância de avaliar em termos de impacto social e económico a resultante da aplicação do perímetro de protecção. Assume grande importância na selecção do método a aplicar, e os custos associados podem dividir-se em dois grandes grupos (ITGE, 1991):

- \* Custos directos: custos relacionados com a delimitação do perímetro de protecção (e.g. obras e instalações na captação, instalação de equipamentos de monitorização e controlo);
- \* Custos variáveis: custos que resultam das restrições impostas às actividades económicas e sociais no interior das zonas definidas pelo perímetro de protecção. Podem atingir valores muito elevados, uma vez que podem envolver alteração ao uso do solo. Podem também obrigar a alterações ou deslocações de actividades potencialmente contaminantes, que podem gerar elevadas indemnizações e expropriações.

As considerações políticas implicam que os limites sejam definidos com clareza, com um bom suporte técnico e científico, uma vez que serão impostas restrições ao uso do território. A Tabela 29 resume as considerações técnicas de cada método a seleccionar.

Tabela 29 - Selecção do método com base em considerações técnicas (adaptado de EPA, 1987).

Método	Facilidade de aplicação	Complexidade dos dados requeridos	Adaptabilidade ao modelo hidrogeológico regional	Precisão
Raio fixado arbitrariamente	Alta	Baixa	Baixa	Baixa
Raio fixo calculado	Alta	Baixa	Média/Baixa	(1) Média/Alta (2) Baixa
Métodos analíticos	Média	Média	Média	(1) Alta (2) Média
Métodos hidrogeológicos	Baixa	Média/Alta	Alta	(1) Média/Baixa (2) Média/Alta
Modelos matemáticos de fluxo de transporte	Baixa	Alta	Alta	Alta
Poder auto-depurador do terreno	Alta	Baixa/Média	Baixa	Baixa/Média
Emprego de traçadores	Média	Baixa/Média	Alta	Alta
Deteção com trítio	Alta	Baixa	Média/Alta	Média

(1) Gradiente hidráulico baixo e/ou sem limite de fluxo em redor da captação; (2) Gradiente hidráulico alto e/ou com limites de fluxo em redor da captação.

Em suma, na Tabela 30 são apresentados os dados necessários para a aplicação de cada método.

Tabela 30 - Dados necessários a aplicar nos diferentes métodos na elaboração de perímetros de protecção (adaptado de Moinante, 2003).

Método	Dados																		
	K	b	T	S	$\eta_e$	i	Q	I	H	d	t	h	D.I	D.t	D.s.f	l.h	G.a	A	
Raio fixo arbitrário																			
Lei Darcy	F tempo	x				x					x								
	F rebaixamento	x				x	x				x								
Raio fixo calculado	F tempo					x		x		x									
	F rebaixamento				x	x													
Fluxo entre Aquíferos		x			x		x					x							
Fluxo Uniforme	x	x				x	x												
Equação Equilíbrio Thiem	x	x					x				x								
Hoffman e Lillich	x	x	x	x	x	x	x				x	x							
Wyssling	x	x			x	x	x									x			
Formas variadas simplificadas	x	x			x	x	x									x			
Krijgsman e Lobo-Ferreira	x	x			x	x	x					x							
Albinet				x	x			x					x						
Ábacos	Sauty e Tyre	x	x			x	x	x										x	
	Jacobs e Bear		x	x		x	x	x								x			
Nomogramas de VW e VD		x			x		x	x											
Modelos de fluxo e transporte	x	x	x	x	x		x	x				x	x	x	x	x	x	x	
Horsley		x						x	x	x	x	x	x						
Hidrogeológicos													x			x	x	x	
Taçadores																			x
Trítio																			x

Onde: k – permeabilidade; b - espessura saturada do aquífero; T – transmissividade; S – coeficiente de armazenamento;  $\eta_e$  – porosidade eficaz; i – gradiente hidráulico; Q – caudal; I – infiltração; H – espessura saturada na captação; d – rebaixamento; t – tempo de extracção; h – piezometria antes da extracção; D.I – dispersividade longitudinal; D.t – dispersividade transversal; A – Análises; D.s.f – Direcção e sentido do fluxo; l.h – limites hidrogeológicos; G.a – geometria do aquífero; A – análises.

## CAPÍTULO IV

### 7. CASO DE ESTUDO: RECURSO HIDROMINERAL DE ENTRE-OS-RIOS

#### 7.1. INFORMAÇÃO CONSULTADA

O local onde se insere o caso de estudo, foi alvo de estudos técnico científicos prévios, onde foram consultadas informações de natureza geotécnica e hidrogeológica, assim como o modelo hidrogeológico conceptual da área, dos quais se destacam:

- \* “Estudo hidrogeológico das Caldas de Entre-os-Rios, Obra n.º 2018, Relatório Final” (A. Cavaco, 1987);
- \* “Estudos e prospecção para captação e aumento de caudais de água sulfurosa e potável no centro do INATEL em Entre-os-Rios, Prospecção Geoelétrica, Obra n.º 2194, Relatório Final” (A. Cavaco, 1989);
- \* “Furos de pesquisa e eventual captação de água mineral no Centro do INATEL de Entre-os-Rios, Obra n.º 2195, relatório Final” (A. Cavaco, 1990);
- \* “Preservação da Qualidade das Águas Minerais naturais e Águas de Nascente” (IGM, 1999);
- \* “Perímetro de Protecção do Aquífero Hidrotermal das Termas de Entre-os-Rios (Carvalho, 1999);
- \* “A ocorrência de água sulfúrea alcalina no Maciço Hespérico: quadro hidrogeológico e quimiogénese” (Calado, 2001);
- \* “Caracterização hidrogeológica preliminar e avaliação da qualidade das águas (na área envolvente ao posto de gasolina da *REPSOL* do Lugar da Torre (INETI, 2006);
- \* “Análise e validação do perímetro de protecção da captação de águas subterrâneas do centro de férias do INATEL – Quinta da Torre, em Entre-os-Rios (Furo de Barbeitos) e parecer sobre a eventual contaminação das águas e dos solos da área” (LNEC, 2008);
- \* “Hidrogeomorfologia e sustentabilidade de recursos hídricos subterrâneos”, Tese de Doutoramento, apresentada à Universidade de Aveiro (Teixeira, 2011);
- \* “Evolução hidrogeoquímica das águas sulfúreas de Entre-os-Rios: avaliação preliminar”, Tese de Mestrado, apresentada ao Instituto Superior do Porto (Ferreira, M., 2013).
- \* Relatório de Análise Físico-Química Completa – Fundação Inatel, Furo dos Barbeitos, situado em Quinta da Torre, Entre-os-Rios (LAIST, 2018).

Para a elaboração do presente estudo foi ainda inventariada a informação disponível sobre a região, nos seguintes documentos:

- \* Decreto-Lei 90/90, de 16 de Março, que disciplina o regime geral de aproveitamento dos recursos geológicos;
- \* Decreto-Lei 86/90, de 16 de Março, que aprova o regulamento das águas minerais;
- \* Decreto-Lei 382/99, de 22 de Setembro, que estabelece as normas e os critérios para a delimitação de perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público;
- \* “Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Douro. Relatório Final” (INAG, 2001);
- \* Carta Geológica da Folha 13-B: Castelo de Paiva, à escala 1:50 000, e respectiva Notícia Explicativa (Medeiros et al., 1964);
- \* Carta Militar de Portugal, à escala 1:25 000, folha 135, do Instituto Geográfico do Exército.

## 7.2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A freguesia de Eja, cujo topónimo vem da palavra de origem celta, que significa rio, é influenciada pela sua localização da confluência dos rios Tâmega e Douro. No entanto, ficou mais conhecida pelo nome “Entre-os-Rios”, onde desde o tempo dos romanos, existem banhos. Para além deste importante património natural e paisagístico (Figura 18), importa referir o património edificado. Entre-os-Rios, possui a nível regional, uma peculiar paisagem urbana ribeirinha. A malha urbana medieval foi crescendo ao longo da encosta escarpada, com um desenho orgânico rigorosamente encaixado na vertente, e segundo dados do INE (2011), possui uma densidade populacional de 238,2 hab/km<sup>2</sup> (INE, 2011).



Figura 18 - Esquerda: Entrada do Balneário Termal de Entre-os-Rios; Direita: Espaço verde das Termas de Entre-os-Rios.

O Furo de Barbeitos situa-se no Maciço Antigo, na Região Hidrográfica do Douro, numa zona de convergência de rios (Figura 19). As características geomorfológicas e hidrogeológicas da região, conferem condições favoráveis à existência de nascentes de carácter permanente, conferindo á região um local de interesse.

A delimitação do perímetro de protecção do Furo de Barbeitos do Centro de Férias do INATEL, situado na Quinta da Torre, em Entre-os-Rios, na freguesia de Eja, no concelho de Penafiel e no distrito do Porto, ficou aprovada pela Portaria n.º 203/2003, DR 56, Série I-B, 07-03-2003 (ANEXO II). A concessão de exploração de água mineral possui o número de cadastro HM-23 e a designação de Entre-os-Rios (Quinta da Torre). Ocupa uma área á superfície de 96,6 ha, coincidente com a zona de protecção intermédia do perímetro de protecção (polígono ABCD) do furo de Barbeitos, já a zona de protecção alargada ocupa uma área de 241,8ha (polígono EFGH) (Figura 20).

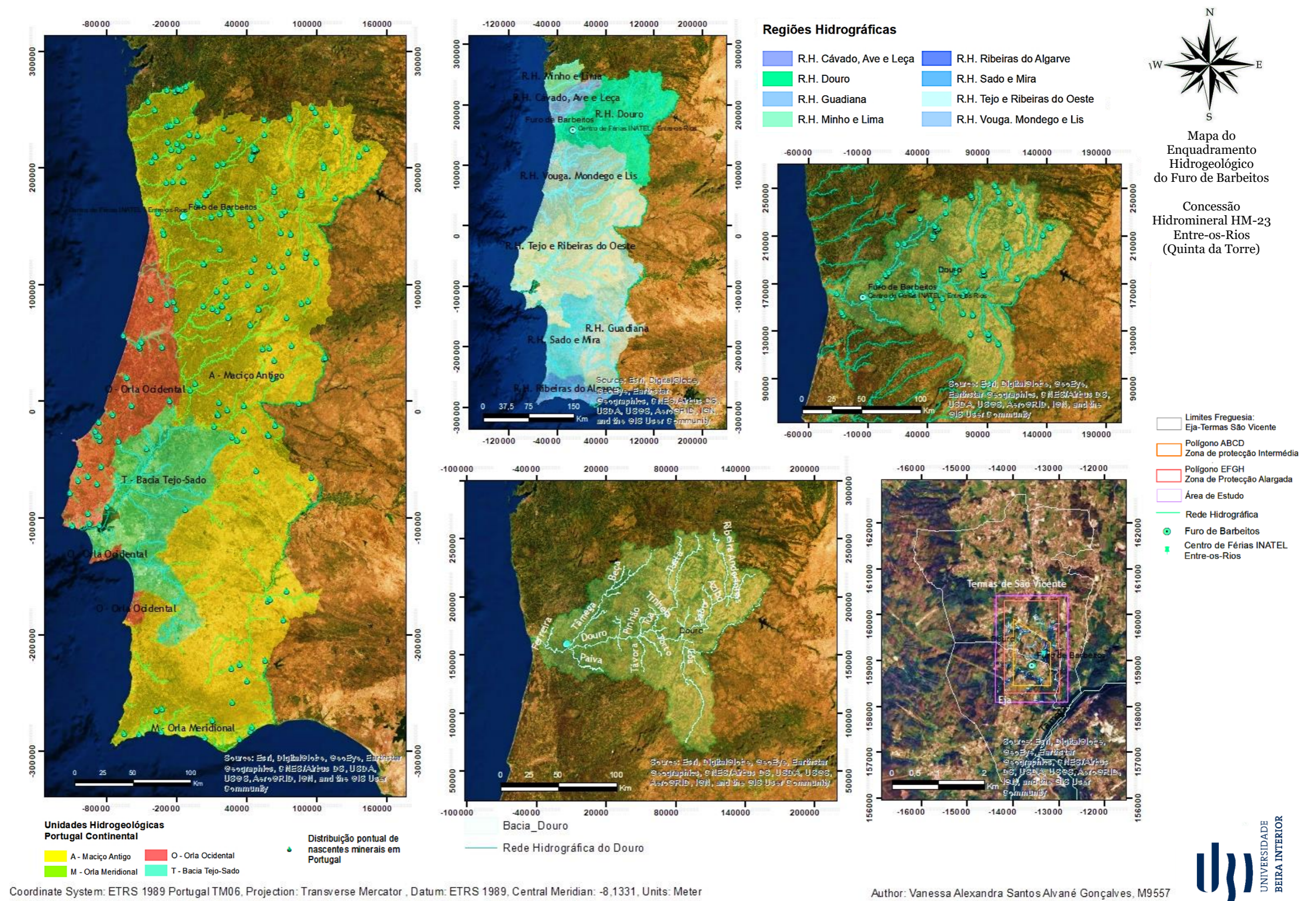


Figura 19 - Mapa do enquadramento Hidrogeológico do Furo de Barbeitos do Centro de Férias do INATEL, situado no Maciço Antigo, na Bacia do Douro, no Distrito do Porto, Concelho de Penafiel e Freguesia de Eja (dados: SNIAMB), Fonte: Autor).

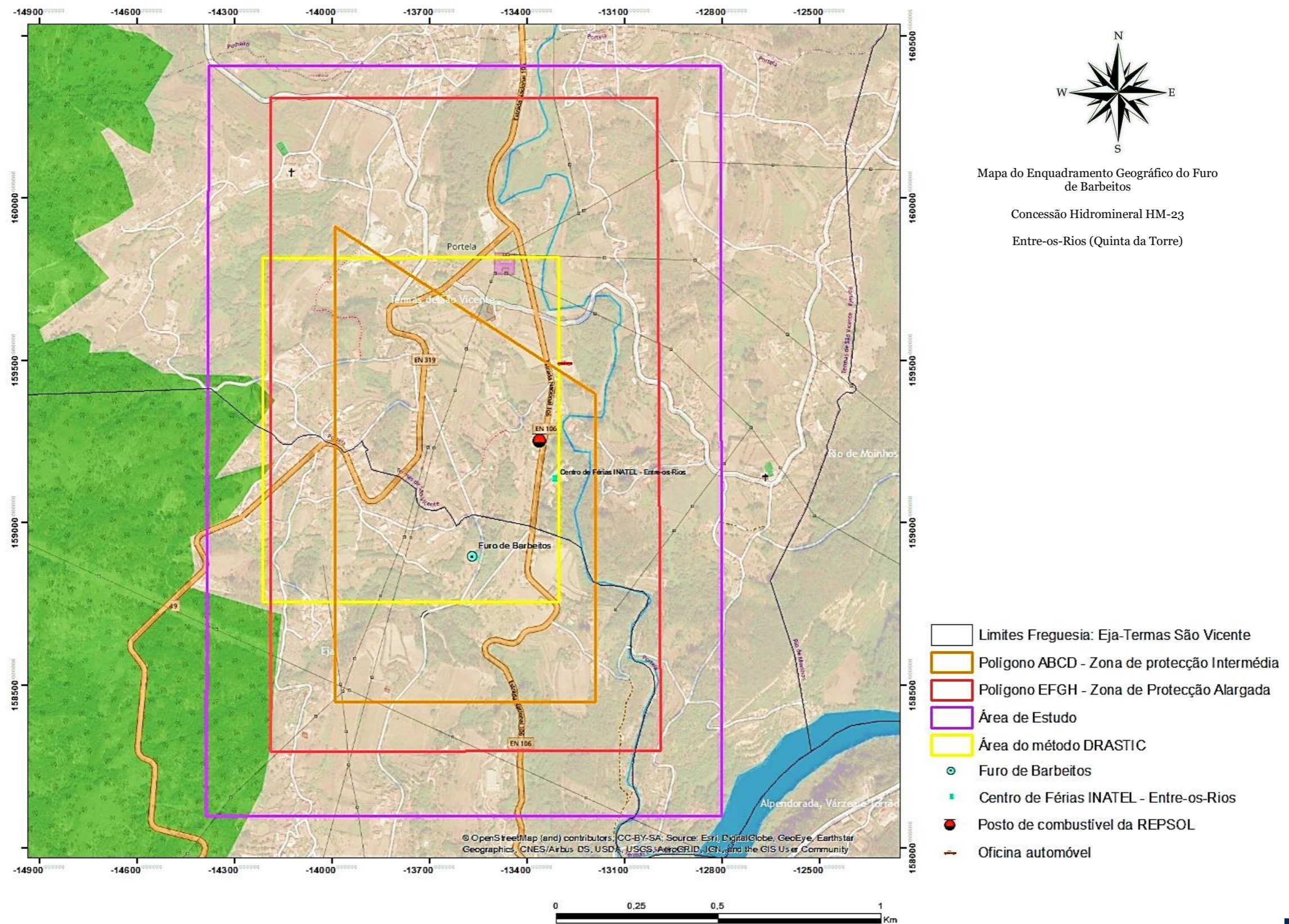


Figura 20 - Mapa do Enquadramento Geográfico do Furo de Barbeitos; Polígono ABCD (Zona intermédia do perímetro de protecção); Polígono EFGH (Zona alargada do perímetro de protecção) da Concessão Hidromineral HM-23 de Entre-os-Rios (Quinta da Torre), (Portaria nº 203/2003, de 7 de Março, Fonte: Autor).

### 7.3. CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA, TECTÓNICA E GEOLÓGICA

Do ponto de vista geomorfológico a área é caracterizada por variações fortes de declives (Figura 21), sendo que os relevos predominantes estão relacionados sobretudo, com a existência de rochas quartzíticas do Ordovício, que por erosão diferencial, deram origem a cristas orientadas na direcção NW-SE. A região é talhada por uma rede relativamente densa de cursos de água, fortemente encaixados, que se lançam no Rio Douro, depois de descreverem percursos quase sempre muito sinuosos (Carvalho & Cavaleiro, 2000). Os blocos montanhosos, individualizados por um conjunto de falhas com direcções N-S a NNE-SSW, explicam o traçado rectilíneo da Ribeira de Camba, da Ribeira de Matos, e da Ribeira das Lages, bem como os seus vales encaixados junto da foz. Os lineamentos<sup>12</sup> ENE-WSW a NW-SE determinam a disposição em blocos escalonados de topo aplanado, que são quase exclusivamente entalhados pela rede hidrográfica secundária (Ribeiro et al., 1987; Teixeira, 2011).

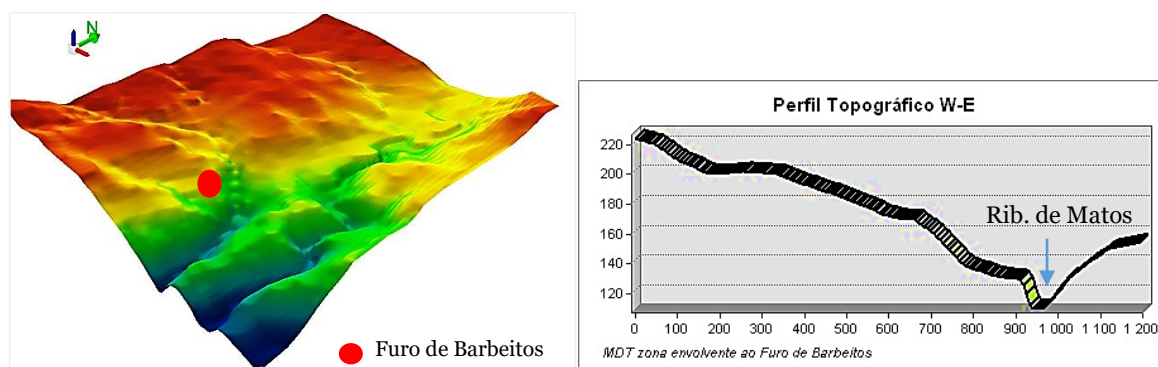


Figura 21 - Esquerda: Modelo Digital de Terreno do local de estudo, recorrendo à ferramenta ArcScene; Direita: Perfil Topográfico do local de estudo entre o Furo de Barbeitos e a bomba Repsol com orientação W-E (dados: CIGeoE, Fonte: Autor).

Do ponto de vista tectónico, o maciço apresenta-se à escala local, dominado por sistemas de discontinuidades (falhas, diáclases, fracturas), em regra sub-verticais, nomeadamente os sistemas: N-S a NNE-SSW ( $N10^{\circ}W$  a  $N25^{\circ}E$  onde o intervalo azimutal mais frequente é  $N0^{\circ}-15^{\circ}E$ , sendo uma das famílias de discontinuidades mais importantes, apresentam caixas de falhas e zonas de esmagamento de dimensão apreciável - 0,5 a 1,5m; NE-SW ( $N45^{\circ}E$ , sendo o intervalo azimutal mais frequente  $N40^{\circ}-55^{\circ}E$ ); NW-SE a WNW-ESSE ( $N45^{\circ}-85^{\circ}W$ , sendo o intervalo azimutal mais frequente  $N35^{\circ}-80^{\circ}W$ ); e ainda a referir as discontinuidades horizontais a sub-horizontais. Em regra, os contactos encontram-se bastante esmagados e alterados, denunciando um importante controlo estrutural (Carvalho & Cavaleiro, 2000; LABCARGA, 2009; Teixeira, 2011).

<sup>12</sup> Feição crustal linear profunda, de grande extensão, descontínua, que se expressa na topografia de forma marcada, e que reflecte as condições geo-estruturais que lhe estão subjacentes, sendo por isso um excelente indicador da estrutura geológica e tectónica (O'Leary et al., 1976; Cara et al., 1982; Babar, 2005; Sander, 2007; in Teixeira, 2011).

Na área de estudo e do ponto de vista geológico, a litologia que ocorre é essencialmente de natureza granítica (Figura 22 e 23). Apesar da correspondência da sua composição mineralógica, os granitos exibem, por vezes, texturas e granularidades distintas. O local localiza-se sobre uma mancha de granito porfiróide de grão fino. A rocha contacta a toda a volta com o granito porfiróide de grão grosseiro e esse contacto tanto pode ocorrer de forma gradual, em certos pontos, como ser bastante nítido noutros pontos (Figura 24) (Medeiros et al., 1964). As nascentes parecem ocorrer no contacto entre os dois tipos de granito e sempre em zonas de grande diaclasamento, principalmente na direcção N20°E (Teixeira, 2011).

Um estudo geológico de pormenor (Figura 25), possibilitou a caracterização da área de estudo do seguinte modo (Medeiros et al., 1964, 1980; Pereira et al., 1989; Carvalho & Cavaleiro, 2000; LABCARGA, 2009; Teixeira, 2011):

- \* Rochas sedimentares: aluviões, que correspondem a depósitos coluvionares e aluvionares de fundo de vale, de matriz argilo-arenosa. Apresentam fraca expressão cartográfica, à escala apresentada, surgindo apenas nos vales da ribeira de Matos.
- \* Rochas graníticas: fazem parte de uma faixa de granitóides Variscos, cobrindo praticamente toda a área de estudo e podem ser sintetizados em três unidades. O granito porfiróide, de grão grosseiro, de duas micas, essencialmente biotítico, correspondente à unidade regional; rochas granitóides de grão fino a médio, ricas em biotite com megacristais, em geral feldspato; granodioritos e raros quartzodioritos biotíticos;
- \* Rochas filonianas: estão instaladas um pouco por toda a área, no seio das massas graníticas. Identificam-se filões de microgranitos de duas micas, essencialmente biotíticos – correspondem a filonetes de cor geralmente clara, acinzentada, passando, por alteração, a cor cinza acastanhada, mais escuro. A espessura máxima observada não ultrapassa os 30 cm. Parece ser esta a rocha que condiciona localmente a emergência da água (pelo menos na Torre) e também a norte, nas vizinhas termas de S. Vicente. Aflora ainda uma estrutura dolerítica no extremo SE da região.

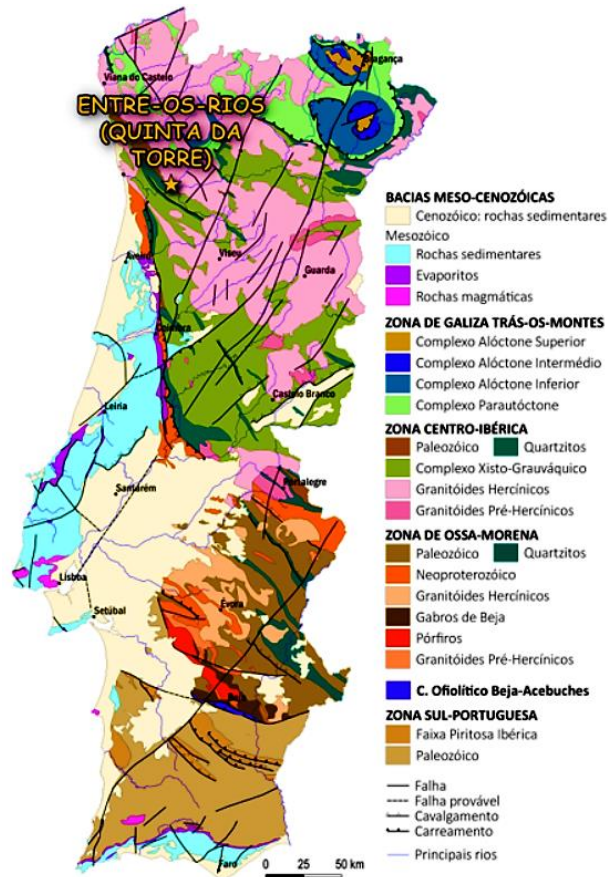


Figura 22 - Localização da Captação de Entre-os-Rios, no contexto geológico e tectónico (adaptada da Carta Geológica de Portugal à escala 1:1.000.000; LNEG, 2010).

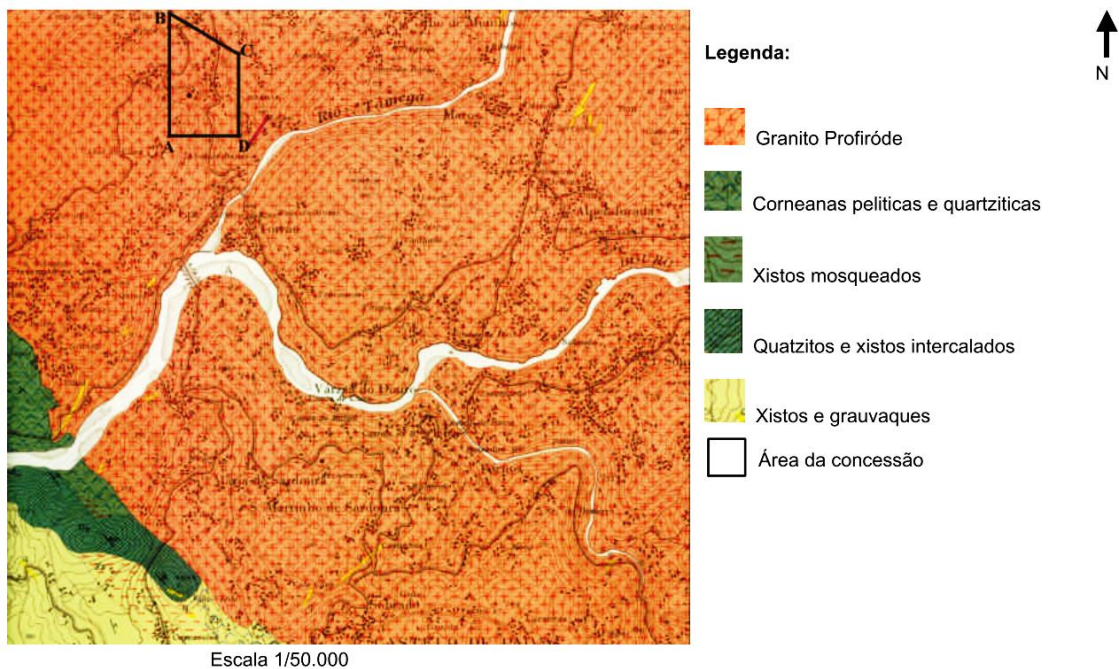


Figura 23 - Extracto da Carta Geológica Folha 13-B Castelo de Paiva à escala 1/50.000 (Carvalho & Cavaleiro, 2000).

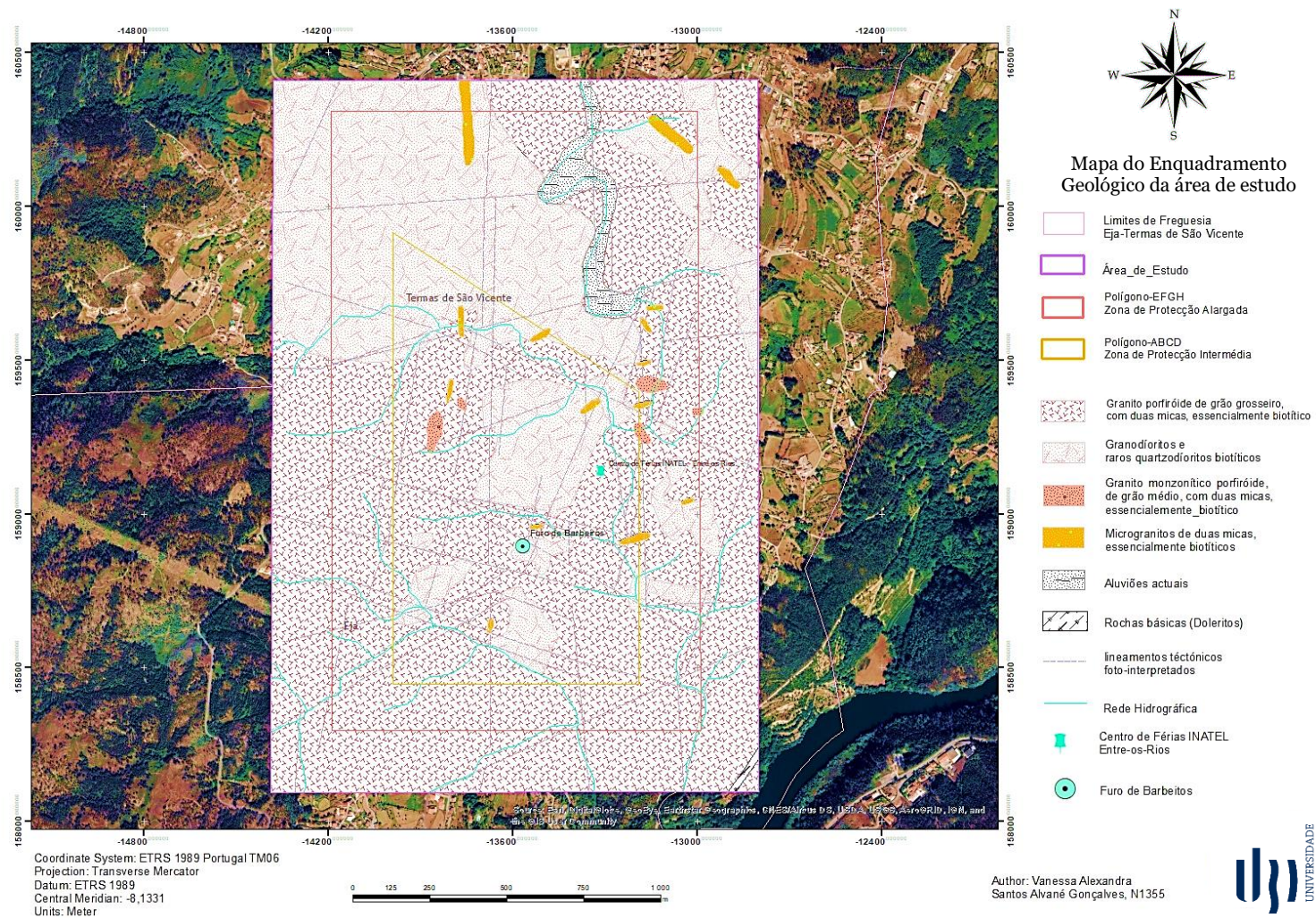


Figura 24 - Mapa do esboço geológico regional da área envolvente ao Furo de Barbeitos (dados: Teixeira, 2011; Fonte: Autor).

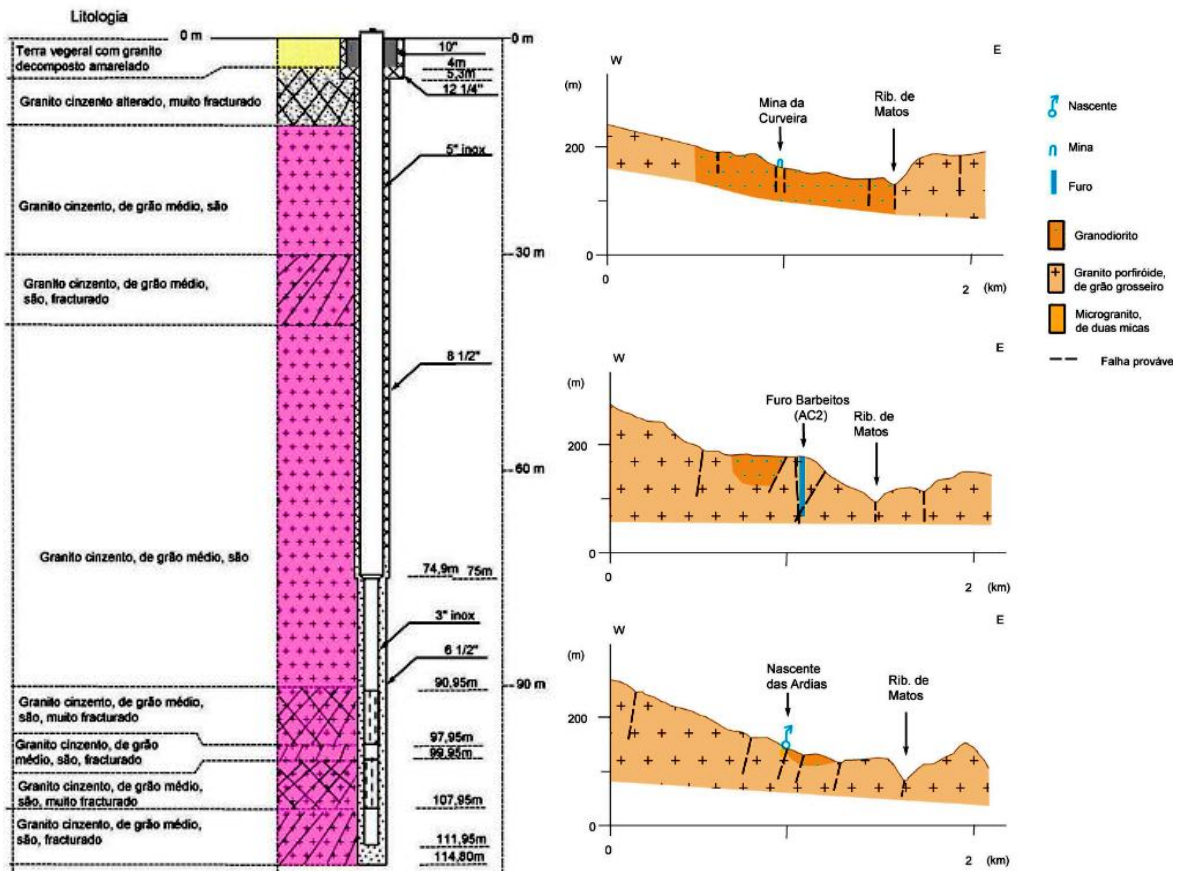


Figura 25 - Esquerda: Furo Barbeitos: perfil geológico esquemático (adaptado de A. Cavaco, 1990; Ferreira, M., 2013); Direita: Perfis geológicos da área de Entre-os-Rios com a localização da Mina (ou Nascente) da Curveira, Furo Barbeitos e Nascente das Ardias; sobre-elevação vertical: 3 vezes escala horizontal (Teixeira, 2011; Ferreira, M., 2013).

#### 7.4. CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA, HIDROGEOLÓGICA E HIDROQUÍMICA

As águas das termas de Entre-os-Rios são águas frias, de circulação profunda e quimismo peculiar, fortemente contrastantes com as águas comuns da parte superior do maciço granítico e das formações suprajacentes (Carvalho & Cavaleiro, 2000). Segundo Teixeira (2011), as nascentes clássicas (Torre, Arcos, Curveira e Ardias) ocorrem em zonas de forte diaclasamento, na dependência da fracturação sub-vertical, N-S a N15°E e N60-80°W. O alinhamento das nascentes dá-se ao longo de uma encosta de falha regional, com orientação N20°E, sendo o desnível topográfico na ordem dos 50 a 60m. Segundo o autor, suspeita-se a existência de armadilhas hidrogeológicas para as águas minerais, as quais poderão ser alvo de futuros trabalhos de pesquisa e eventual captação de água mineral. As águas minerais de Entre-os-Rios, resultam da convergência dos seguintes sistemas de fracturação: N-S a NNE-SSW (fracturação regional); ENE-WSW (fracturas de expressão regional); NE-

SW (fracturação discreta); descontinuidades sub-horizontais (compartimentação do maciço).

Estas características geomorfológicas e a elevada pluviosidade da região, conferem-lhe condições hidrológicas bastante favoráveis, daí a existência de um grande número de nascentes de carácter permanente (Carvalho & Cavaleiro, 2000). A análise das condições hidrogeológicas ocorrentes na área de estudo, contempla: o reservatório, as características hidrodinâmicas, as características hidroquímicas e as características de recarga.

#### 7.4.1. RESERVATÓRIO, CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS E HIDRODINÂMICAS

Como se pode observar na Tabela 31, na área de estudo prevalecem as formações com permeabilidade secundária devido à fissuração, salvo nas zonas superficiais mais ou menos meteorizadas das rochas eruptivas e ainda nas manchas coluvio-aluvionares existentes. A circulação de água subterrânea faz-se através de fissuras, e quanto maior for o grau de fracturação e menor o preenchimento, particularmente com elementos de natureza argilosa, maior será o seu interesse. Nas zonas mais fortemente meteorizadas, a alteração pode alcançar espessuras apreciáveis da ordem de várias dezenas de metros. No que diz respeito aos depósitos coluvio-aluvionares e solos residuais, importa referir a sua escassa espessura e a elevada percentagem de fracção argilosa, resultante da argilitização das rochas envolventes (Carvalho & Cavaleiro, 2000).

Tabela 31 - Resumo das Unidades Hidrogeológicas do local de estudo (adaptado de Carvalho & Cavaleiro, 2000; LABCARGA, 2009; Teixeira, 2011).

Características	Unidades Hidrogeológicas			
	I	II	III	IV
Geologia	Rochas Sedimentares Aluviões actuais	Rochas Graníticas Granodioritos Granito porfiróide		Rochas Filonianas Microgranitos
Representatividade Cartográfica	Fraca	Elevada	Elevada	Fraca
Ligação à rede Hidrográfica	Sim	Não	Não	Não
Tipo de Escoamento	Meio poroso	Meio fracturado (rocha sã) e Meio poroso (horizonte de alteração)		Meio Fissural
Horizonte de alteração	Baixa espessura, argiloso e arenoso	Baixa espessura, material argiloso	Alta espessura, material argiloso e arenoso	Material argiloso
Vulnerabilidade à Poluição	Elevada	Muito baixa	Baixa	Média

A Tabela 32 resume os parâmetros hidrogeológicos que caracterizam o aquífero granítico de Entre-os-Rios, reflectidos na conceptualização do modelo do funcionamento do sistema hidromineral em estudo.

Tabela 32 -Resumo dos Parâmetros hidrogeológicos (adaptado de LNEC, 2008).

Aquífero granítico de Entre-os-Rios		
Parâmetro		Valor
Transmissividade (m <sup>2</sup> /d)		5,7
Coeficiente de Armazenamento		0,0004
Caudal de extracção (Q, m <sup>3</sup> /d)	máximo recomendado	216
	médio (diário)	100
Espessura saturada (b, m) valor médio		100
Porosidade eficaz (n, %)		2
Gradiente hidráulico (i, %)		10 - 15
Condutividade hidráulica (K, m/d)		0,4

No que diz respeito à Hidroclimatologia (Figura 26 e 27) e (Tabela 33), o local de estudo situa-se em zona de influência Atlântica, caracterizada por verões frescos, Invernos suaves e precipitação média anual acima dos 1000 mm, com excepção dos meses secos (Atlas da Comissão Nacional do Ambiente, SNIAmb, Carvalho et. al., 2000; Carvalho, 2006; Teixeira, 2011).

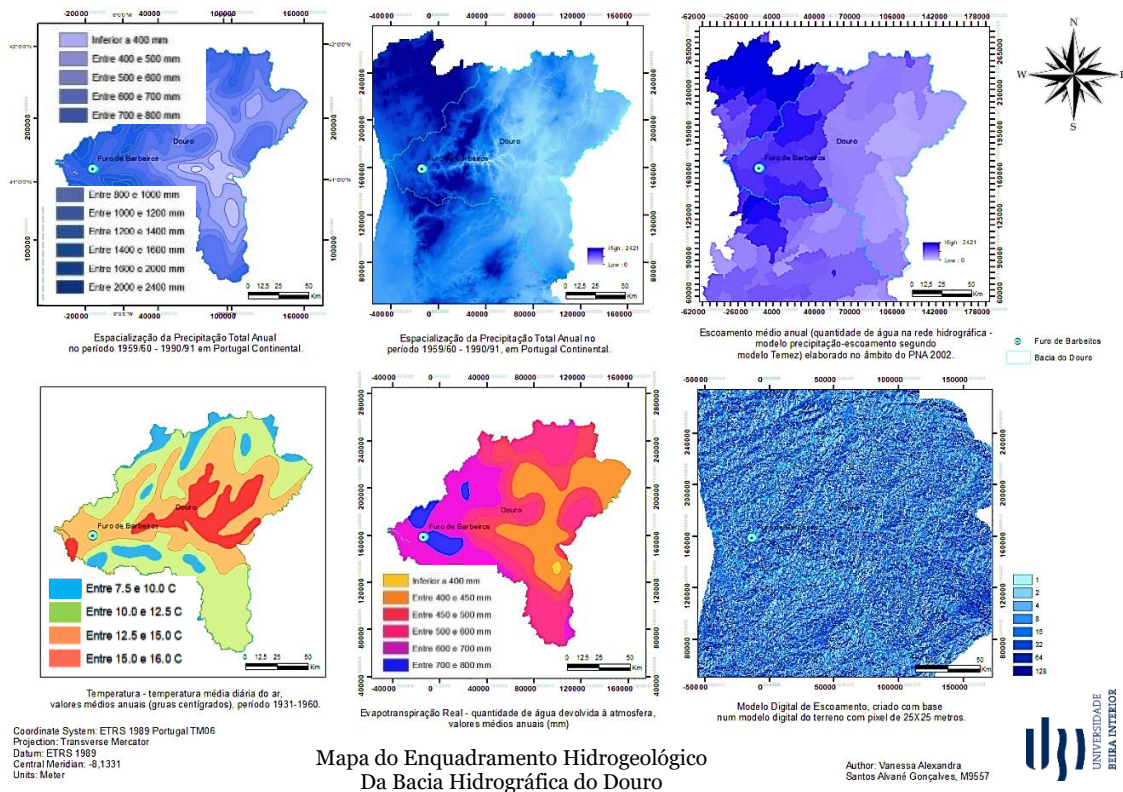


Figura 26 - Mapa do Enquadramento Hidroclimatológico da Bacia Hidrográfica do Douro, onde se insere a área de estudo (dados: SNIAmb, Fonte: Autor).

Tabela 33 - Enquadramento dos elementos climáticos do local de estudo (adaptado de Teixeira, 2011).

Hidroclimatologia	
Precipitação média anual (mm)	1160
Temperatura média diária do ar (°C)	14,1
Evapotranspiração potencial (mm)	627
Evapotranspiração real (mm)	507,6
Déficit hídrico (mm)	119,4
Excedentes hídricos (mm)	827,1
Taxa de infiltração (mm)	200 (15%)
Recarga profunda (mm)	40 (3%)

Mapa do Enquadramento Hidrogeológico de e pormenor da Bacia Hidrográfica do Douro

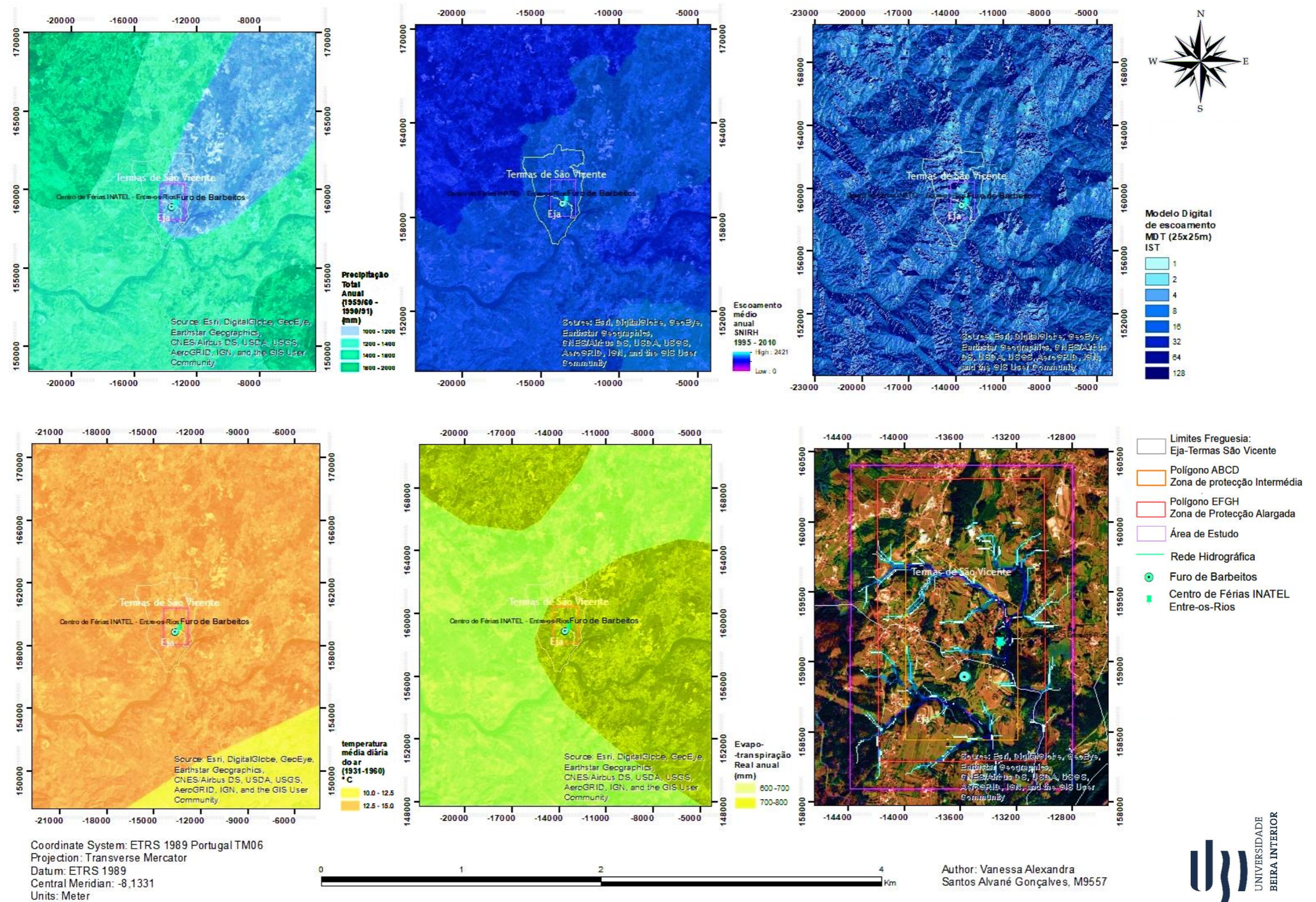


Figura 27 - Mapa do Enquadramento Hidroclimatológico de pormenor da Bacia Hidrográfica do Douro, onde se insere a área de estudo (dados: SNIAMB, Fonte: Autor).

Os valores da precipitação permitem quantificar a recarga de um aquífero, elemento crucial para compreender o modelo conceptual de circulação das águas subterrâneas e para uma exploração sustentável do aquífero.

Teixeira (2011), calculou o valor da evapotranspiração real (ETR), do défice hídrico (DH) e dos excedentes hídricos com base nos valores mais representativos em regularidade temporal de cada estação. O autor recorreu aos dados da estação climatológica de Luzim no período 1984-1998.

Os défices hídricos entre Maio e Setembro, são caracterizados por períodos de seca. Os excedentes hídricos correspondem ao período húmido, onde a reposição hídrica se inicia em Novembro (Figura 28).

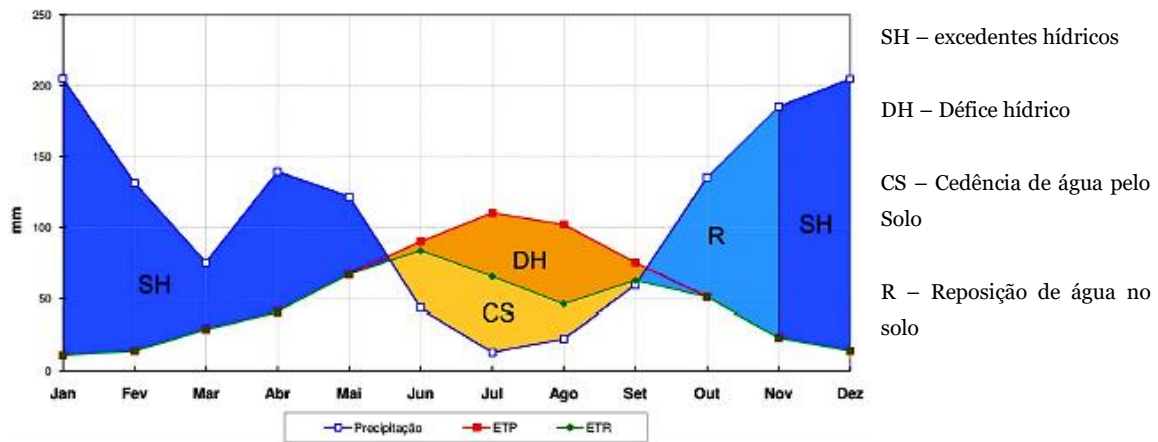


Figura 28 - Balanço hidrológico sequencial mensal relativo à estação climatológica de Luzim ((Teixeira, 2011).

No que diz respeito à caracterização da água mineral de Entre-os-Rios, os valores da condutividade eléctrica observada (Tabela 34), sugere um tempo de interacção com o meio aquífero importante. A água mineral será de origem meteórica, com um longo tempo de permanência no sistema profundo, que segundo Calado (2001), classifica estas águas entre as mais lentas no conjunto das águas sulfúreas do país. O valor do pH ronda os 8,8 sendo de carácter básico, resultante da interacção com o maciço granítico rico em sílica. A temperatura apresenta um valor médio de 20,5 °C, pertencendo estas à classe das águas hipotermais. A ausência de turvação pode ainda estar relacionada com a velocidade de infiltração e circulação no meio se processar de lenta forma, num meio fracturado com nível freático relativamente próximo da superfície topográfica.

Segundo o Projecto Hidrogenoma desenvolvido pela DGEG em 2010, o estudo do microbismo natural confirma a presença de duas comunidades bacterianas representativas: *Betaproteobacteria* e *Gammaproteobacteria*. Na classificação ao nível do género, o hidrogenoma desta água é caracterizado por três géneros, nomeadamente *Thiofaba*, *Methyloversatilis* e *Sulfuritalea*. No que diz respeito às espécies, as mais representativas são: *Methyloversatilis universalis*, *Denitratisoma oestradiolicum* e *Acinetobacter ursingii*. (DGEG, 2020).

Tabela 34 - Caracterização hidrogeoquímica da água mineral do Furo de Barbeitos para os anos de 1990 a 2012 e 2018 (Ferreira, M., 2013; LAIST, 2018).

Caracterização Hidrogeoquímica do Furo - Barbeitos				
Parâmetros Organolépticos	Sabor	"Doce"		
	Cheiro	Intenso a sulfídrico		
	Coloração	Incolor		
	Depósito	Nulo		
	Turvação	Límpida		
Parâmetros Globais	Parâmetro	Valor Mediano (1990 – 2012)	Valor de 2018	Classificação e Observações
	Temperatura (°C)	20,5	21,6	Águas Hipotermais
	pH (in situ)	8,9	9	Águas Alcalinas
	Alcalinidade total (CaCO <sub>3</sub> , mg/L)	197,9	192	Reacção muito alcalina
	Condutividade eléctrica (µS.cm <sup>-1</sup> )	614	594	Média
	Sulfuração total (mg/L)	24,5	23	Águas Sulfúreas
	Dureza (CaCO <sub>3</sub> , mg/L)	-	7,2	Águas muito brandas
	Resíduo Seco (a 180° C, mg/L)	439	407	Debilmente ou pouco mineralizadas
	Mineralização Total (mg/L)	489	503	
	Total de Sólidos Dissolvidos (mg/L)	200 - 1000	-	
	Teores em Sílica (SiO <sub>2</sub> , mg/L)	43,5	47	Aproximadamente 10% da mineralização total
	CO <sub>2</sub> Total (CO <sub>2</sub> , mmol/L)	2,9	2,9	-
	Enxofre Total (mmol S/L)	-	0,8	-
Aniões (mg/L)	Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> )	129,9 - 192	160	Águas Bicarbonatadas (aproximadamente 60% da Mineralização Total)
	Cloreto (Cl)	56,1 - 62,5	59	
	Hidrogenossulfureto (HS)	25,3	28	
	Tiosulfato (S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	-	25	
	Fluoreto (F)	21	20	
	Silicato (H <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub> )	7,6	9,8	
	Carbonato (CO <sub>3</sub> )	5,6	7,4	
	Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	5,4	1,2	
Catiões (mg/L)	Nitratos (NO <sub>3</sub> )	0,2	< 0,3	Águas Sódicas (aproximadamente 30% da Mineralização Total)
	Sódio (Na)	142	143	
	Cálcio (Ca)	3	2,9	
	Potássio (K)	2,8	2,9	
	Lítio (Li)	1,3	1,4	
	Magnésio (Mg)	0,2	< 0,1	
Amónio (NH <sub>4</sub> , mg/L)	1,1	1,3		
Elementos Vestigiários	Boro, Césio, Tungsténio, Estrôncio, Rubídio, Ferro, Alumínio, Manganês, Selénio, Níquel, Vanádio, Zinco, entre outros			

A fácies hidrogeoquímica das águas minerais de Entre-os-Rios é Bicarbonatada Sódica.

Segundo o LAIST (2018), e de acordo com a classificação tradicional do Instituto de Hidrologia de Lisboa, a água do Furo de Barbeitos é uma água fracamente mineralizada, sulfúrea, fluoretada, com reacção alcalina e macia.

Relativamente ao Lítio, apresenta teores próximos de 1 mg/L em todas as nascentes, já no que diz respeito ao NH<sub>4</sub>, segundo Machado (1988) e Calado (2001), é uma característica das águas sulfúreas. De acordo com Carvalho & Cavaleiro (2000), a caracterização radioactiva apresenta actividade em <sup>226</sup>Ra < 5 mBq.L<sup>-1</sup> e actividade Beta Total 100 ± 42 mBq.L<sup>-1</sup>.

A água do Furo de Barbeitos, apresenta uma baixa variabilidade temporal dos seus parâmetros, permitindo através de uma constante monitorização poder inferir quando surgem focos de contaminação no aquífero.

Em 2006, o INATEL solicitou ao Núcleo de Águas Subterrâneas do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC, um estudo para a análise da eventual contaminação da água e do solo, como consequência de um derrame de petróleo que terá tido origem em tanques subterrâneos de um posto de abastecimento de combustível. O combustível derramado poderá ter ultrapassado os 4000 litros e terá supostamente ultrapassado os limites dos terrenos da conceção da gasoleira e ter-se-á infiltrado em terrenos mais distantes (LNEC, 2008). A presença de hidrocarbonetos nas águas minerais pode indicar a possibilidade da existência de percolação preferencial em profundidade, como sugere o modelo da tectónica apresentado por A. Cavaco (1987).

Segundo (Carvalho, 1999), ficaram indicadas algumas eventuais fontes de contaminação localizadas no interior do perímetro de protecção do Furo de Barbeitos (Figura 29), tais como:

- \* Existência de grandes terrenos agrícolas, ocupados principalmente por horticultura e vinha, onde a utilização de fertilizantes e/ou pesticidas constitui um risco significativo de poluição;
- \* Ausência de saneamento básico, onde a existência do elevado número de fossas sépticas e as descargas directas de afluentes, possam comprometer a qualidade da água subterrânea;
- \* Instalações de pequenas indústrias;
- \* Drenagem das escorrências das estradas, estando associados metais pesados, hidrocarbonetos, entre outros;
- \* Posto de abastecimento de combustíveis, onde em 2002 ocorreu um derrame de gasolina.



Figura 29 - Esquerda: aspectos da caseta de protecção do Furo de Barbeitos; Direita: Interior da caseta e boca do Furo de Barbeitos.

Os níveis piezométricos foram medidos nos furos da área de estudo na mesma campanha do LNEC (Tabela 35) e (Figura 30) e os quais foram interpolados no ArcGIS para a área de estudo DRASTIC (Figura 31).

Tabela 35 - Características gerais dos pontos de água inventariados (LNEC, 2008; Teixeira, 2011 – dados referentes a Setembro e Outubro de 2008).

Cód.	Cota (m)	T (°C)	pH	Conductividade eléctrica (µS/cm)	Profundidade (m)	Profundidade ao n. piezométrico	Observações
P1	170,3	22,1	8,9	650	114,8	Furo tapado	Furo de Barbeitos
P2	158,6	18,5	8,96	739			Nascente Arcos Direita
P3	159,9	17,6	8,32	562			Nascente Arcos Esquerda
P5/P7	120	17,7	5,95	152		-	Mina Direita e Esquerda
P8	156,6	18,1	5,5	205			Nascente Casa velha
N1	160	17,2	8,74	600			Nascente Curveira
N4	163,7	16,9	5,97	310			Nascente Torre
F1	186,3	16,4	4,86	169	6,4	1,18	Poço
F2	184,4	18,44	4,32	75	4,93	1,08	Poço
F3	180,7	17,16	4,45	108	6,8	3,04	Poço
F4	184,3	18,7	4,1	107	7,5	2,47	Poço
F5	180,2	18,2	6,02	221	8,4	2,1	Poço
F6	165,9	18,2	5,21	193	3,24	0,42	Poço
F7	141,4	16,3	5,24	114	6,76	0,43	Poço
F8	146,3	-	-	-	2,3	0,51	Poço
F9	140	18,1	6,91	132	-	-	Poço
F11	178,9	21,72	4,11	106	15,6	4,07	Poço
F12	188,9	16,1	4,98	175	11	4,33	Poço
F13	186,6	16,5	5,5	231	7,05	0,2	Poço
F14	173,6	16,78	4,9	148	9	0,34	Poço
F15	185,3	22,71	5,02	178	9,23	4,45	Poço
F16	184,6	16,2	6,19	162	14	9,13	Poço
F17	179,6	16,4	5,78	66	13	9,27	Poço
F18	210,5	18,6	6,33	163	10,52	0,97	Poço
F19	-	20,2	4,68	203	15,3	11,22	Poço
F20	187,5	16,9	5,37	169	10,4	7,53	Poço
F21	190,1	20,4	5,09	216	7	0,86	Poço (uso doméstico)
F22	192,7	17,1	4,8	219	14,5	8,6	Poço (uso doméstico)
F23	172,7	17,6	5,79	114	7,8	3,67	Poço (rega)
F24	173,1	18,3	6,21	121	6,3	4,71	Poço (sem uso)
F25	154,4	-	-	-	68	-	Furo da Torre
F26	135	18,3	5,9	161	9,5	1,56	Poço (uso doméstico)
F28	127,3	-	-	-	9,34	2,55	Poço - Casa Lampreias
F29	117,3	17,3	5,28	335	90	-	Furo
F30	137,4	-	-	-	8	0,91	Poço
F32	135,6	17,3	6,13	135	28	3,55	Furo - Estação Repsol

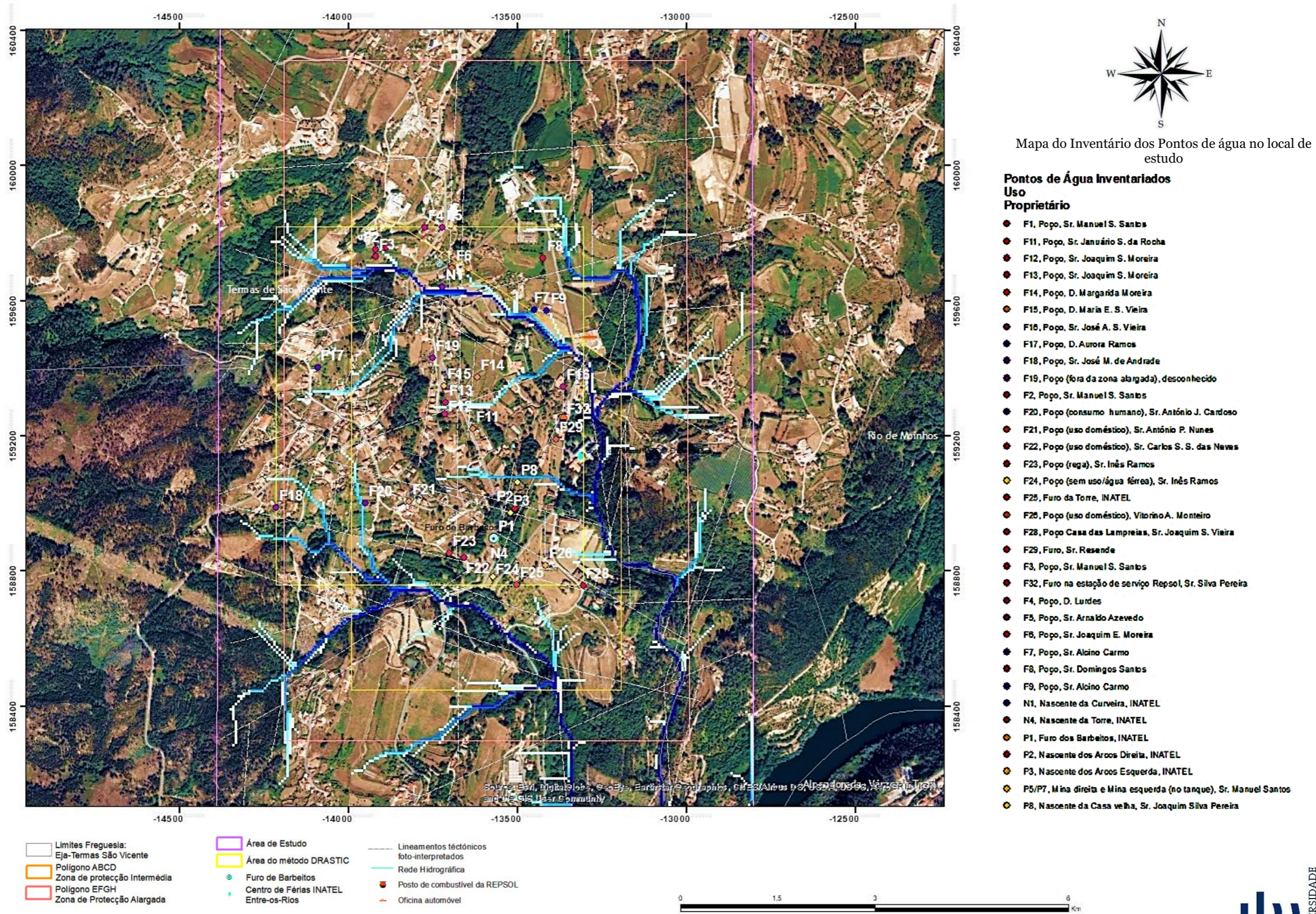


Figura 30 - Mapa do Inventário dos Pontos de Água inseridos na área de estudo (dados: LNEC, 2008; Teixeira, 2011; Ferreira, M., 2013; Fonte: Autor).

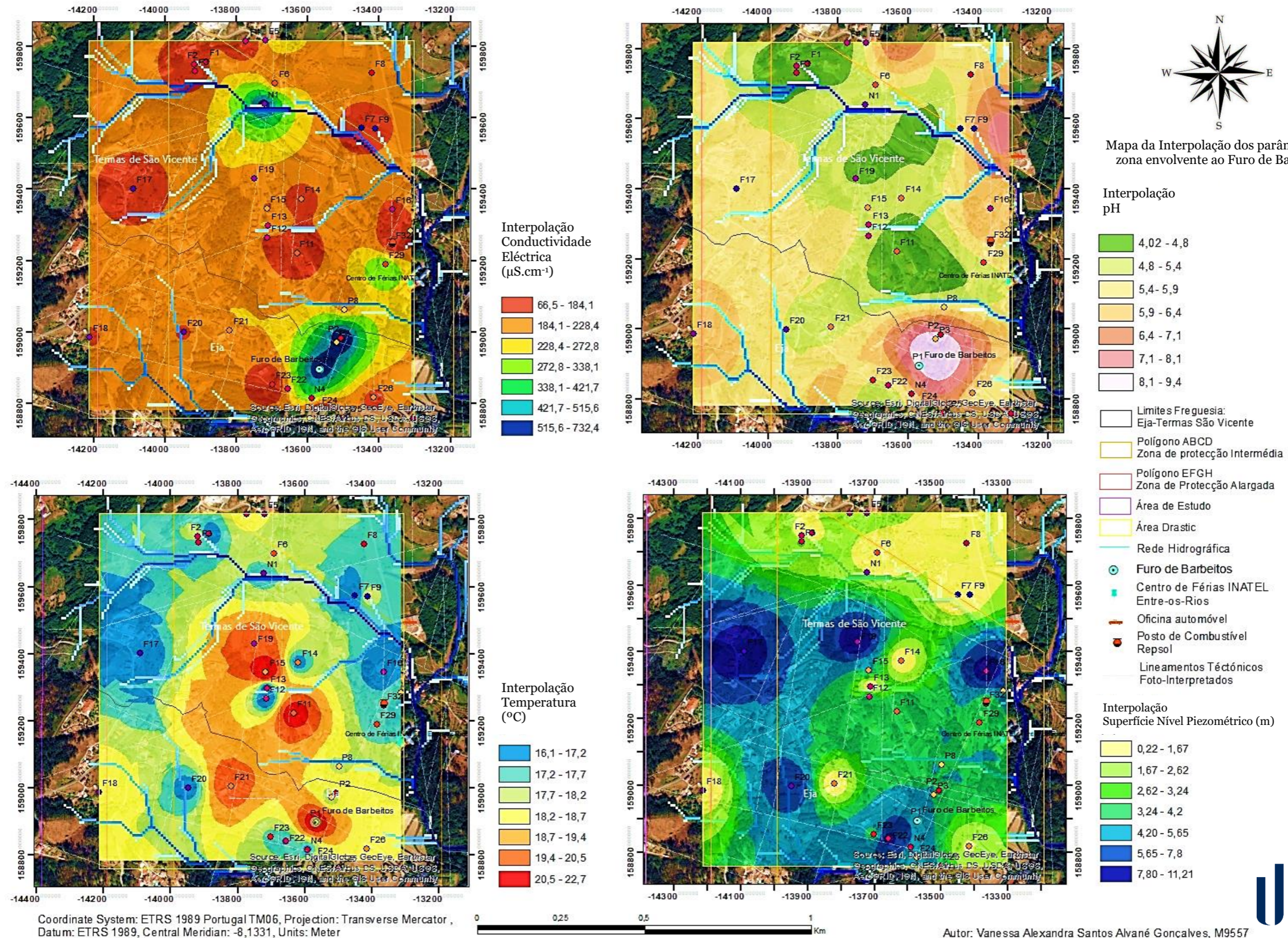


Figura 31 - Mapa da Interpolação de Parâmetros - Conductividade Eléctrica, pH, Temperatura, Superfície Nível Piezométrico (dados: LNEC 2008; Teixeira 2011; Ferreira, M., 2013; Fonte: Autor).

#### 7.4.2. MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL

O sistema hidromineral de Entre-os-Rios (Figura 32), foi proposto por Teixeira (2011), diferenciando os seguintes sistemas aquíferos:

- \* Um aquífero livre, ao nível da superfície, muito alterado e decomposto, representando um papel fundamental na recarga dos aquíferos subjacentes;
- \* Um aquífero livre a semi-confinado com circulação de águas normais nas zonas alteradas e, na maior parte de zonas fissuras do granito; o pH situa-se entre os 4,1 a 6 e a condutividade eléctrica é inferior a 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Os caudais, em regra geral, são inferiores a 0,2 L/s;
- \* Um aquífero mineral confinado, localizado em profundidade, excepto no local de emergência, junto às captações, condicionado por uma zona de fraqueza estrutural em profundidade. O Furo de Barbeitos, localizado a uma profundidade máxima de 114 m na rocha granítica, próximo a um contacto com os granodioritos, apresenta um caudal de exploração de cerca de 2,5 L/s; o pH varia entre 8,4 e 8,9 e a condutividade eléctrica oscila entre 550 e 620  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

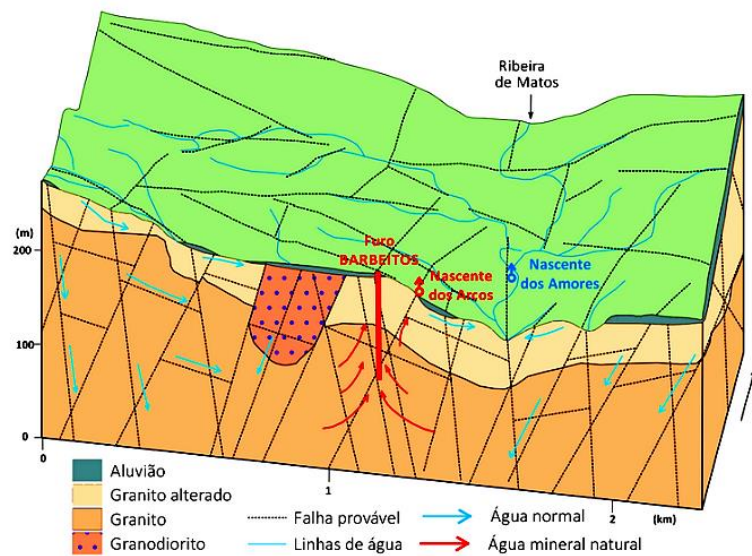


Figura 32 - Modelo Hidrogeológico conceptual da área de Entre-os-Rios (Teixeira, 2011; Ferreira, M., 2013).

### 7.5. METODOLOGIA – SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

#### 7.5.1. GENERALIDADES

Os SIG disponibilizam modernas ferramentas de gestão e ordenamento do território, com aplicação crescente em todas as áreas das Geociências e do Ambiente. Através do processamento e análise de dados georreferenciados, é possível criar Sistemas de Apoio à Decisão. Sendo uma tecnologia em franco processo de desenvolvimento, é difícil chegar a uma definição de SIG – há inclusive os que chegam a considerar os SIG como uma ciência

e não como uma ferramenta (Goodchild, 1997). Os SIG são um campo de difícil definição, uma vez que são objecto de estudo e utilização por diversas áreas do conhecimento, e cada uma delas vai orientar o recurso, logo o conceito, de acordo com as suas necessidades e objectivos. São assim, sistemas integrados de hardware, software, dados, pessoas, organizações e técnicas para adquirir, armazenar, analisar e disseminar informação acerca de áreas da superfície terrestre.

O ArcGIS é um conjunto de aplicações criadas pela ESRI - *Environmental Systems Research Institute*. Agrupa uma variedade de aplicações através das quais se podem executar diferentes tarefas de análise, edição, visualização e gestão de bases de dados geográficas, com destaque para o *ArcMap*, *ArcScene* e *ArcToolbox*. O *ArcGIS Online*, permite utilizar, criar e partilhar mapas, aplicações, camadas, ferramentas de análise e dados, com acesso a mapas prontos a utilizar e à *cloud ESRI*, onde é permitido adicionar e publicar camadas web. Destaca-se ainda a aplicação *ModelBuilder*, que permite criar modelos de processamento, automatizando as tarefas, e a aplicação *Phyton*, que permite desenvolver scripts e comandos de geoprocessamento.

#### 7.5.2. DETECÇÃO REMOTA E FOTO-INTERPRETAÇÃO DA ÁREA DE ENTRE-OS-RIOS

A detecção remota baseia-se num conjunto de processos e técnicas para adquirir informação sobre um determinado objecto à distância, sendo uma ferramenta preponderante na área das Geociências. As informações sobre o objecto, são derivadas a partir da detecção e medida das modificações que ele impõe sobre a energia electromagnética. Os sensores poderão estar desde algumas centenas de metros acima da superfície terrestre (e.g. fotografia aérea, LIDAR - *Light Detection and Ranging*), ou a centenas ou mesmo milhares de quilómetros (e.g. satélites). A fotografia aérea foi uma das primeiras formas de detecção remota e é ainda muito aplicada em estudos de foto-interpretação geológica e geomorfológica (Vergara, 1988). Uma das grandes vantagens é a possibilidade de adquirir informação sobre amplas regiões, com um custo reduzido por unidade de área. Importa ainda referir a possibilidade de recorrer ao cálculo dos índices de vegetação, uma vez que permitem analisar possíveis áreas de descarga. As imagens de satélite monocromomática e a banda do infravermelho, ajudam na validação de dados em relação às estruturas mais dificilmente observáveis (e.g. estruturas sub-horizontais).

Recorreu-se a imagens multi-espectrais geradas a partir dos sistemas-sensores Sentinel-2. A missão Sentinel-2A possui uma órbita quase polar e dispõe de um sensor MSI (MultiSpectral Instrument) de grande resolução espacial (10 m, 20 m ou 60 m). Cada imagem do satélite Sentinel-2 tem uma dimensão de 100 por 100 km, com 12 bits por pixel.

Cada imagem é constituída por 13 bandas, de comprimento de onda e resolução espacial específica (Tabela 36) (ESA, 2017).

Tabela 36 - Diferentes bandas do Sentinel-2, comprimentos de onda e resolução espacial específica (adaptado de ESA, 2017).

Sentinel-2		
Instituição	ESA	
Altitude	786 Km	
Resolução temporal	10 dias/5dias	
Resolução Radiométrica	12 bits	
Bandas	Comprimentos de onda (nm)	Resolução espacial (m)
B1 - <i>Coastal aerosol</i>	443	60
B2 - <i>Blue</i>	490	10
B3 - <i>Green</i>	560	10
B4 - <i>Red</i>	665	10
B5- <i>Vegetation red edge</i>	705	20
B6- <i>Vegetation red edge</i>	740	20
B7- <i>Vegetation red edge</i>	783	20
B8 - <i>Near Infrared (NIR)</i>	842	10
B8A - <i>Vegetation red edge</i>	865	20
B9 - <i>Water vapour</i>	940	60
B10 - <i>Short wave Infrared (SWIR) - Cirrus</i>	1375	60
B11 - <i>Short wave Infrared (SWIR)</i>	1610	20
B12 - <i>Short wave Infrared (SWIR)</i>	2190	20

A interpretação do terreno através da detecção remota e foto-interpretação serviu sobretudo, para esclarecer e precisar situações morfogeológicas que se afigurem favoráveis à recarga do aquífero. As diferenças acentuadas nos terrenos, na vegetação, nos contactos geológicos, nos alinhamentos e nas fracturas, podem revelar os locais favoráveis de recarga, assim como ajudar a perceber quais as zonas mais vulneráveis à poluição. É possível também identificar a indústria extractiva no enquadramento do local de estudo. Os dados foram cedidos pela ESA (Satélite Sentinel-2), referentes ao dia 29/05/2020, e foram processados com recurso ao ArcGIS, recorrendo à ferramenta *Images Analysis*.

Na combinação RGB *Color Infrared Vegetation* (Figura 33), a vegetação mais saudável aparece a vermelho; os solos variam de castanho escuro a castanho claro; as áreas urbanas surgem em tons de azul claro, amarelo ou cinza, dependendo da composição; as nuvens a branco; a água cristalina a azul escuro e a água turva a ciano (APÊNDICE I). A combinação RGB *Geology* (Figura 33) é interessante para observar falhas, litologia e formações geológicas (APÊNDICE II).

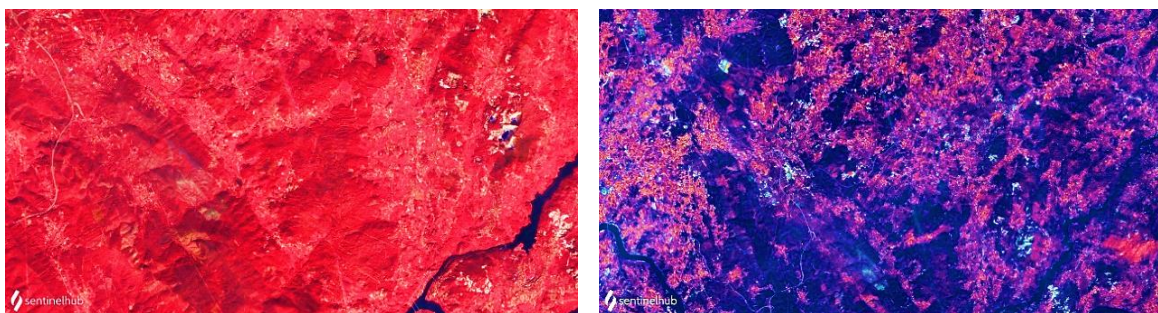


Figura 33 - Esquerda: Color Infrared Vegetation - RGB (B8, B4, B3) da região Entre-os-Rios; Direita: Geology - RGB (B12, B11, B2) da região Entre-os-Rios (<https://apps.sentinel-hub.com>, 2020).

Na combinação RGB *False Color – Urban* (Figura 34), a vegetação é visível em tons de verde; as áreas urbanizadas por branco, cinza ou roxo; os solos, areia e minerais, são apresentados numa variedade de cores; a água, assim como as áreas inundadas, são de um azul muito escuro quase preto (APÊNDICE III). Já a combinação RGB *Agriculture* (Figura 34), é útil para distinguir as áreas cultivadas, que figuram com um verde vibrante, por sua vez, a terra nua assume uma cor magenta; a água aparece num azul muito escuro, quase preto (APÊNDICE IV).

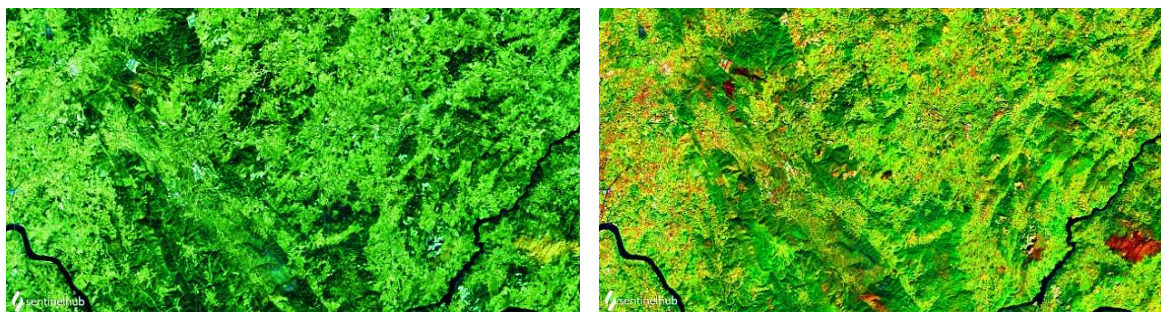


Figura 34 - Esquerda: False Color – URBAN – RGB (B12, B11, B4) da região Entre-os-Rios; Direita: Agriculture - RGB (B12, B11, B4) da região Entre-os-Rios (<https://apps.sentinel-hub.com>, 2020).

O Índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Figura 35) é um indicador sensível da quantidade e condição da vegetação, sendo definido num intervalo entre -1 a 1. Os valores negativos correspondem a nuvens, água e neve; os valores próximos de zero, enquadram as rochas e o solo; os valores positivos, correspondem á vegetação, onde valores entre 0,2 a 0,3 são representados por arbustos, enquanto valores mais elevados, por florestas. A fórmula utilizada foi:  $Float (B5 - B4) / Float (B5 + B4)$ , onde se obteve uma média de 0,32. Áreas mais verdes, poderão representar áreas mais favoráveis para a infiltração de água no solo (APÊNDICE V). O NDMI (*Normalized Difference Moisture Index*) (Figura 35), permite observar através da interpretação do valor absoluto, o reconhecimento das áreas em stress hídrico, sendo ainda mais sensível que o NDVI. Os valores variam entre -1 e +1. A fórmula utilizada foi:  $Float (B8A - B11) / Float (B8A + B11)$ . Os valores mais elevados foram registados nas áreas urbanas, solo descoberto e rocha exposta (APÊNDICE VI).

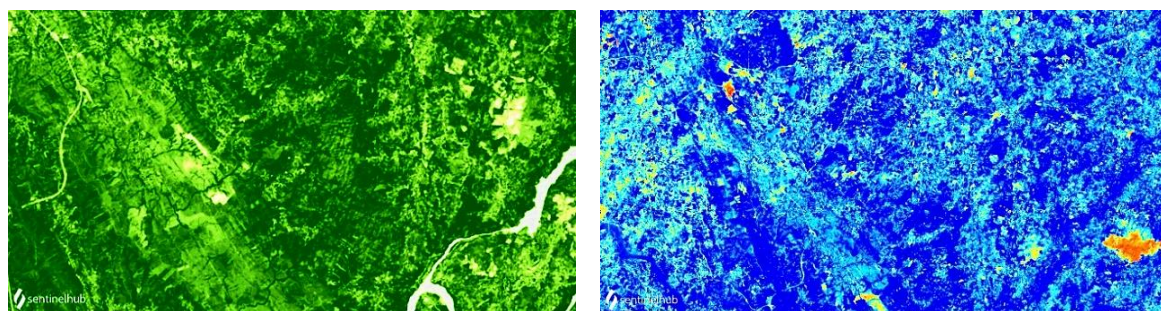


Figura 35 - Esquerda: Normalized Difference Vegetation Index - NDVI da região Entre-os-Rios; Direita: Normalized Difference Moisture Index – NDMI da região Entre-os-Rios (<https://apps.sentinel-hub.com>, 2020).

Os resultados do NDWI (*Normalized Difference Water Index*) (Figura 36), podem ser apresentados na forma de mapas e gráficos, fornecendo informações sobre a distribuição espacial do stress hídrico na vegetação, sendo bastante útil para delinear características da água. Varia entre -1 a +1, e a fórmula utilizada foi:  $Float (B3 - B8) / Float (B3 + B8)$ , através do qual se obteve uma média de -0,24. Os valores mais baixos do NDWI, foram encontrados em zonas de cultivo, os médios em zonas urbanas e os mais altos correspondem aos corpos de água (APÊNDICE VII).

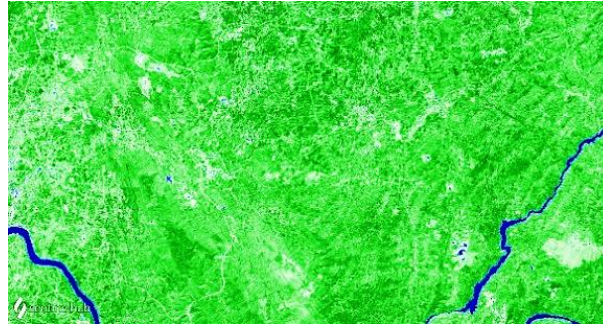


Figura 36 - Normalized Difference Water Index - NDWI da região Entre-os-Rios (<https://apps.sentinel-hub.com>, 2020).

O SWIR (*Short Wave InfraRed*) (Figura 37), permite observar as áreas povoadas a azul claro e as áreas de vegetação escassa a vermelhos mais claros. Ajuda ainda na identificação do tipo de rocha, uma vez que cada uma reflecte as faixas de luz de maneira diferente (APÊNDICE VIII e APÊNDICE IX).

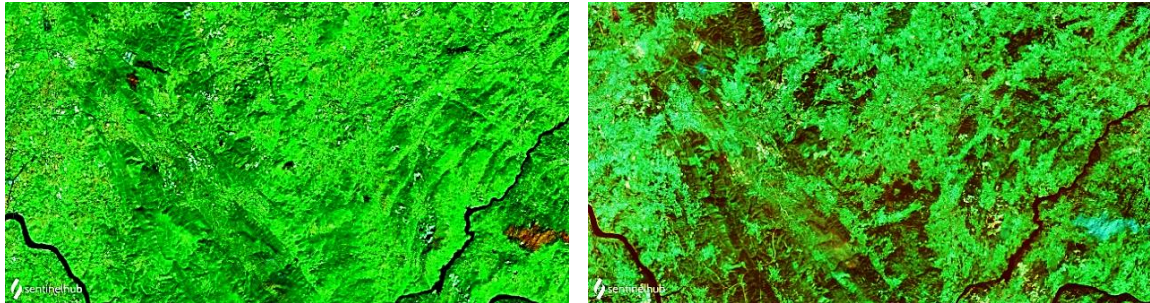


Figura 37 - Esquerda: Short Wave InfraRed-1 - RGB (B12, B8A, B4) da região Entre-os-Rios; Direita: Short Wave InfraRed-2 - RGB (B12, B11, B2) da região Entre-os-Rios (<https://apps.sentinel-hub.com>, 2020).

A Figura 38 resume a análise efectuada na área de Entre-os-Rios, onde se insere o local de estudo, recorrendo-se à detecção remota e fotointerpretação.

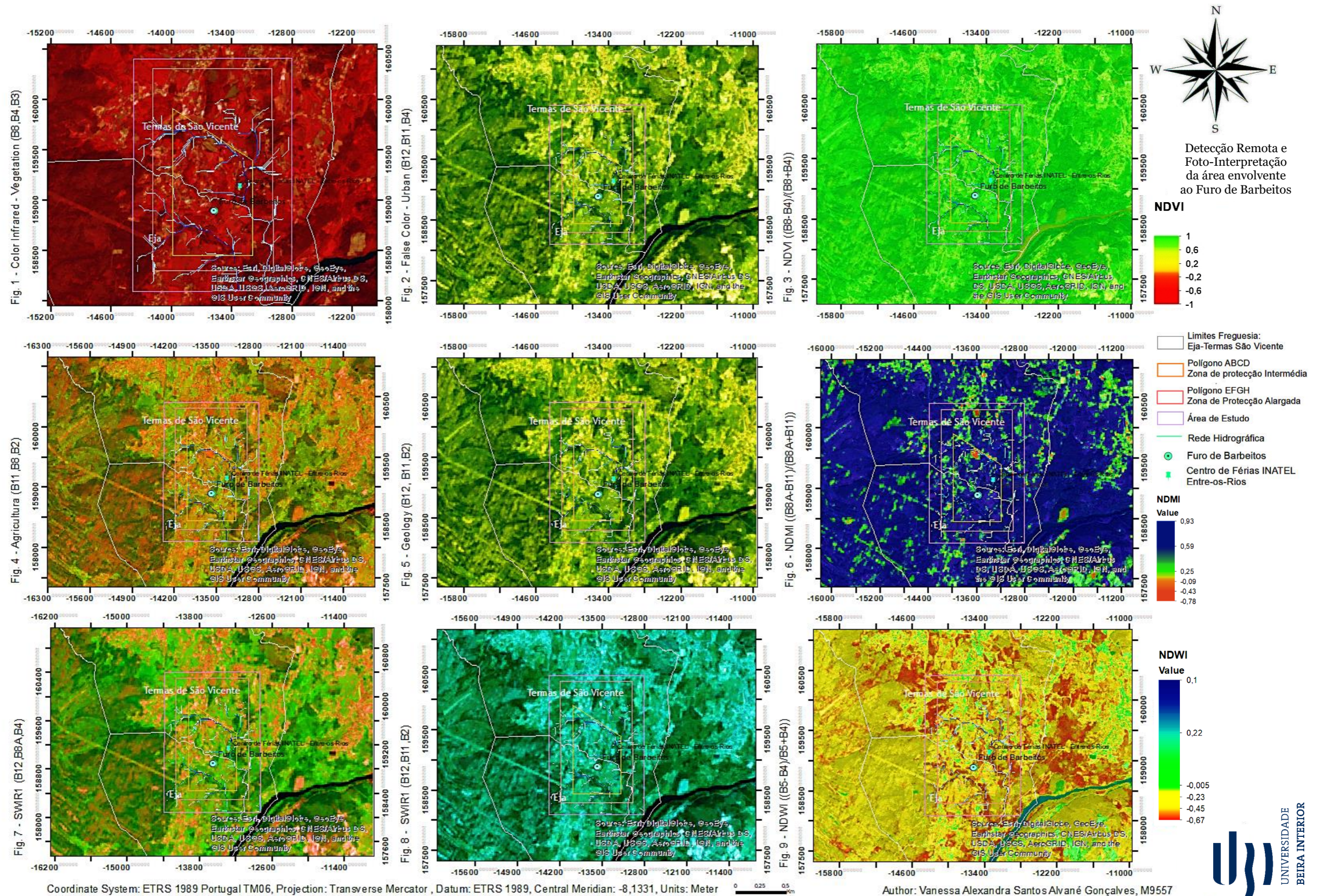


Figura 38 - Mapa das diferentes Combinações RGB do enquadramento do local de estudo (dados: ESA -Sentinel-2, Fonte: Autor).

### 7.5.3. ANÁLISE ESPACIAL E MODELAÇÃO GEOGRÁFICA

A base de dados geográfica, pode ter uma grande variedade de origens e formatos, podendo ser analógicos ou digitais. Já na distribuição de entidades no espaço, a natureza dos objectos é dada pelos seus atributos, a posição pela sua localização geográfica ou coordenadas, e as relações entre entidades em termos de proximidade ou conectividade pela topologia. É possível recorrer a operações com entidades geográficas discretas, que permitem a transformação dos atributos através de operações matemáticas, tais como: operações lógicas, aritméticas, trigonométricas, estatísticas, multivariadas, dependentes de conectividades e operações de distância/localização. As entidades geográficas contínuas permitem modelação espacial, uma vez que os dados se encontram inseridos numa malha de células quadradas e regulares. As operações de álgebra de mapas, permitem realizar operações matemáticas entre várias camadas, conduzindo à resolução de um determinado problema de natureza espacial. Para Matos (2008), as funções de análise espacial podem dividir-se em cinco grupos: sobreposição, proximidade, sobre redes, extracção/fusão e estatísticas. A sobreposição de camadas é uma operação de grande importância nos SIG, e também uma das mais aplicadas em análise espacial, uma vez que pode ser realizada em modelo de dados vectorial ou matricial. Nos modelos estatísticos é estabelecida uma relação empírica entre as variáveis ambientais e determinada propriedade da variável em estudo, através da estimação de parâmetros cuja validade é estatisticamente testável. Outro conjunto de modelos estatísticos baseia-se em técnicas de interpolação espacial, caso em que a modelação geográfica de uma característica ou fenómeno é baseada exclusivamente em informação de natureza espacial (Maurer, 1998).

#### 7.5.3.1. MDT – MODELO DIGITAL DE TERRENO

Os Modelos Digitais de Terreno (MDT – Model Digital Terrain) (Figura 39), permitem a representação da superfície terrestre, possibilitando a visualização da topografia em 3 dimensões. Podem ser obtidos através de uma estrutura matricial ou vectorial, por uma rede irregular de triângulos (TIN – Triangulated Irregular Network). Esta ferramenta, permite dar ênfase a elementos dificilmente visíveis de outro modo (e.g. vales, alinhamentos tectónicos, estruturas geológicas, rede de drenagem).

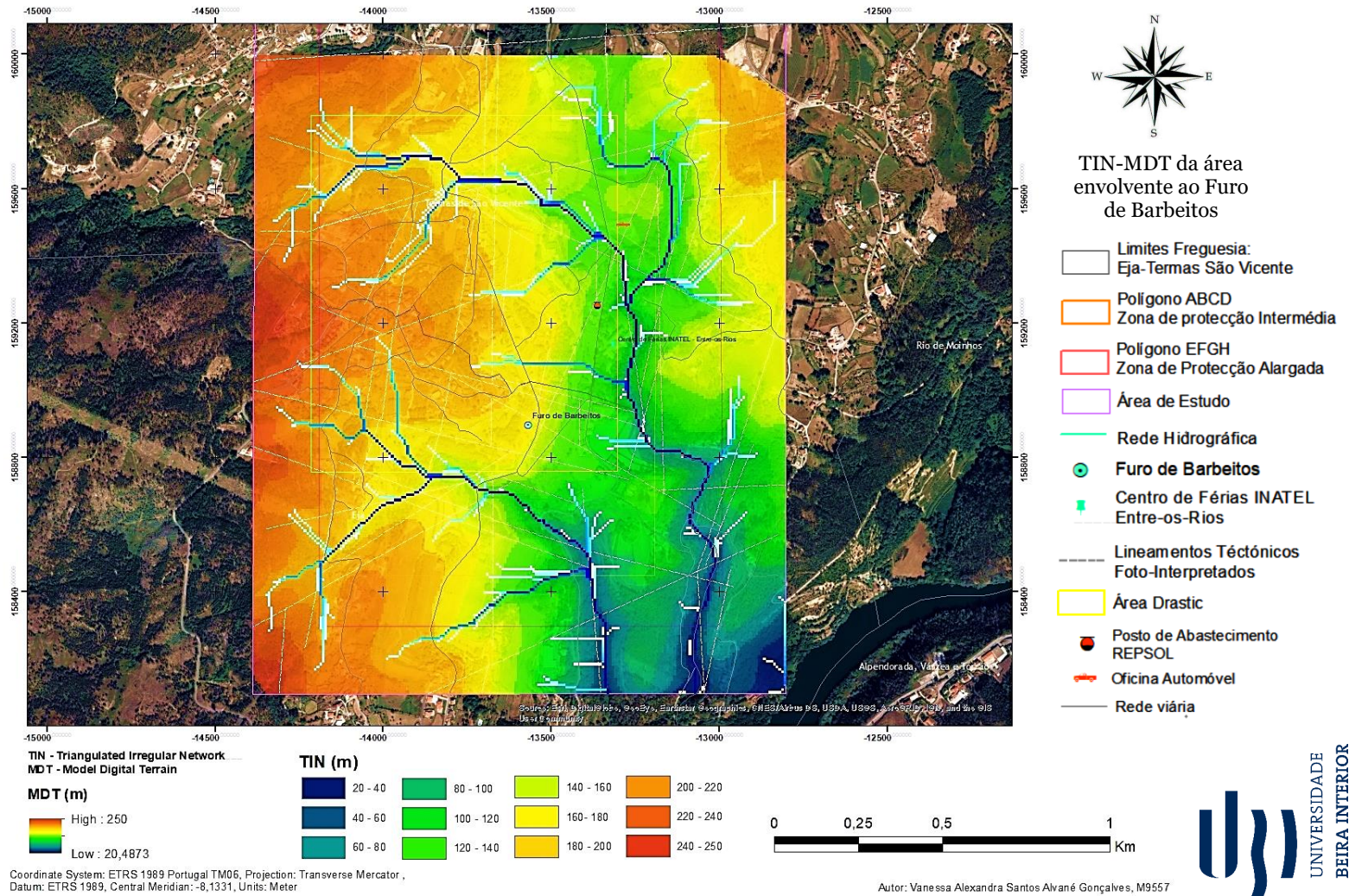


Figura 39 – Modelo Digital de Terreno da área envolvente ao Furo de Barbeitos (dados: CIGeoE, Fonte: Autor).

### 7.5.3.2. MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL

Recorrendo a ferramentas de interpolação espacial é possível estimar valores desconhecidos de uma variável, a partir de valores conhecidos da mesma variável (Figura 31). Envolve a estimativa de valores de um atributo em locais não amostrados, a partir de pontos amostrados na mesma área ou região. Os métodos determinísticos, calculam superfícies baseados na extensão de semelhança entre os pontos ou no grau de suavidade pretendido, através de funções matemáticas. Relativamente aos métodos geoestatísticos, estes geram superfícies baseados em estatísticas e modelos de previsão geoestatísticos, que incluem erros e incertezas na sua previsão. Existem ainda os métodos combinados, que resultam da combinação entre os dois anteriores. Sempre que foi necessário interpolar os valores, foram testados vários modelos (IDW, Ordinary Kriging, Simple Kriging e Universal Kriging), e foi seleccionado o modelo de acordo com: 1) menor Root-mean-square; 2) Mean prediction error com valores perto de zero; 3) Root-mean-square standardized, com valor perto de 1; 4) Average Standard Error, com valor próximo do Root mean square.

### 7.5.3.3. MODELOS DE LOCALIZAÇÃO

Os modelos de localização determinam, com maior ou menor precisão, locais para a localização de um determinado objecto, tendo em consideração a conjugação de diversos factores (variáveis) determinantes na análise. Numa avaliação multicritério, podem ser adoptados dois procedimentos. Um envolve a sobreposição booleana, na qual todos os critérios são reduzidos a declarações lógicas de aptidão (classificados de forma binária:0/1) e estão relacionados por via de operadores lógicos. Já o segundo, envolve a combinação de critérios contínuos (factores), através da normalização para uma escala comum e de ponderação de pesos para obter médias pesadas.

### 7.5.4. OS SIG NA GESTÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS – METODOLOGIA DRASTIC

A elaboração de modelos recorrendo aos SIG, tornou-se imprescindível para um número crescente de estudos sobre vulnerabilidade e qualidade das águas subterrâneas. A sua aplicação demonstra que possui ferramentas de extremo interesse no estudo do risco de contaminação das águas subterrâneas, encontrando-se em constante ascensão. Segundo Mejuto et al. (1999), as crescentes funcionalidades de um SIG, como processos de análise e modelação, permitem quantificar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição, usando parâmetros hidrogeológicos e actividades antropogénicas. Por outro lado, os SIG permitem que sejam tomadas decisões mais adequadas e eficazes nos diferentes domínios num curto espaço de tempo, permitindo ainda responder a questões que não eram possíveis por técnicas não espaciais.

#### 7.5.4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para o cálculo da vulnerabilidade específica de aquíferos, foi utilizado o método DRASTIC (Figura 40), desenvolvido por Aller et al. (1987). Os dados geográficos relativos à geologia, carta dos solos, modelo digital de terreno, pontos de monitorização da precipitação e pontos de monitorização do nível freático foram tratados de acordo com o tipo de análise pretendida. A partir dos dados da geologia, foram obtidas as variáveis para o cálculo do índice parcelar A (material do aquífero), I (impacto da zona não saturada do solo) e C (condutividade hidráulica). A carta dos solos, permitiu obter o índice parcelar S (solos). O modelo digital do terreno, e a reclassificação do cálculo dos declives (%), deu origem ao índice parcelar T (topografia). Os dados relativos à precipitação (mm/ano), permitiram calcular a recarga do aquífero, tendo em conta a relação com as variáveis, que por sua vez foi classificada para dar origem ao índice parcelar R (recarga do aquífero). O índice parcelar D, foi obtido por interpolação dos valores relativos ao nível freático (m). De forma a obter as variáveis a integrar no modelo provenientes da geologia, foi necessário vectorizar as cartas geológicas da área de estudo e atribuir a cada polígono a sua classe litológica. Foram criadas as variáveis da condutividade hidráulica e a transmissividade para o índice C.

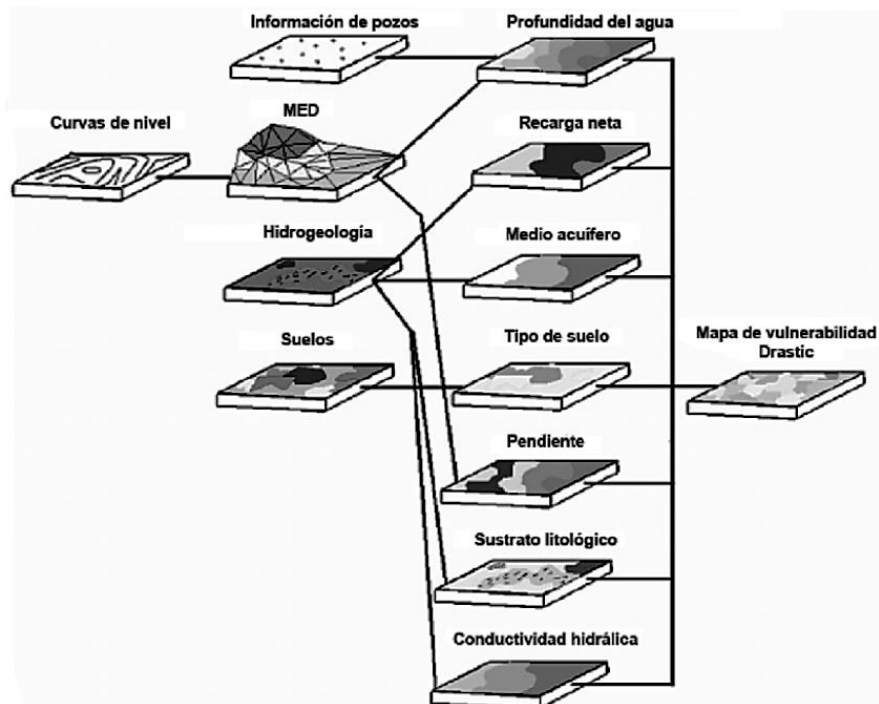


Figura 40 - Esquema da obtenção do Mapa de Vulnerabilidade à poluição do aquífero, por meio dos 7 parâmetros DRASTIC que determinam o transporte de poluentes num ambiente SIG (Agüero J. y Pujol R., 2000).

### 7.5.4.2. PARÂMETRO D – PROFUNDIDADE DO TOPO DO AQUÍFERO

O cálculo do parâmetro D (Figura 41) teve por base as medições piezométricas do ano de 2008, de um conjunto de 25 pontos correspondentes a captações de água (LNEC, 2008). A profundidade do topo do aquífero foi interpolada recorrendo ao IDW (*Inverse Distance Weighted*). O valor médio expectável é de 3,88 m e uma vez que corresponde ao índice 9, infere ser um parâmetro bastante sensível, sendo aconselhável realizar novas medições piezométricas. Por sua vez, a malha dos pontos de água inventariados é também reduzida, assim como a sua área interpolada, impossibilitando que a área dos restantes parâmetros seja superior. Verifica-se que às zonas de maior susceptibilidade correspondem zonas onde a profundidade do topo do aquífero é menor. Sendo assim, o aquífero fica mais susceptível à contaminação de poluentes quando os caudais de exploração são ultrapassados e em períodos de stress hídrico.

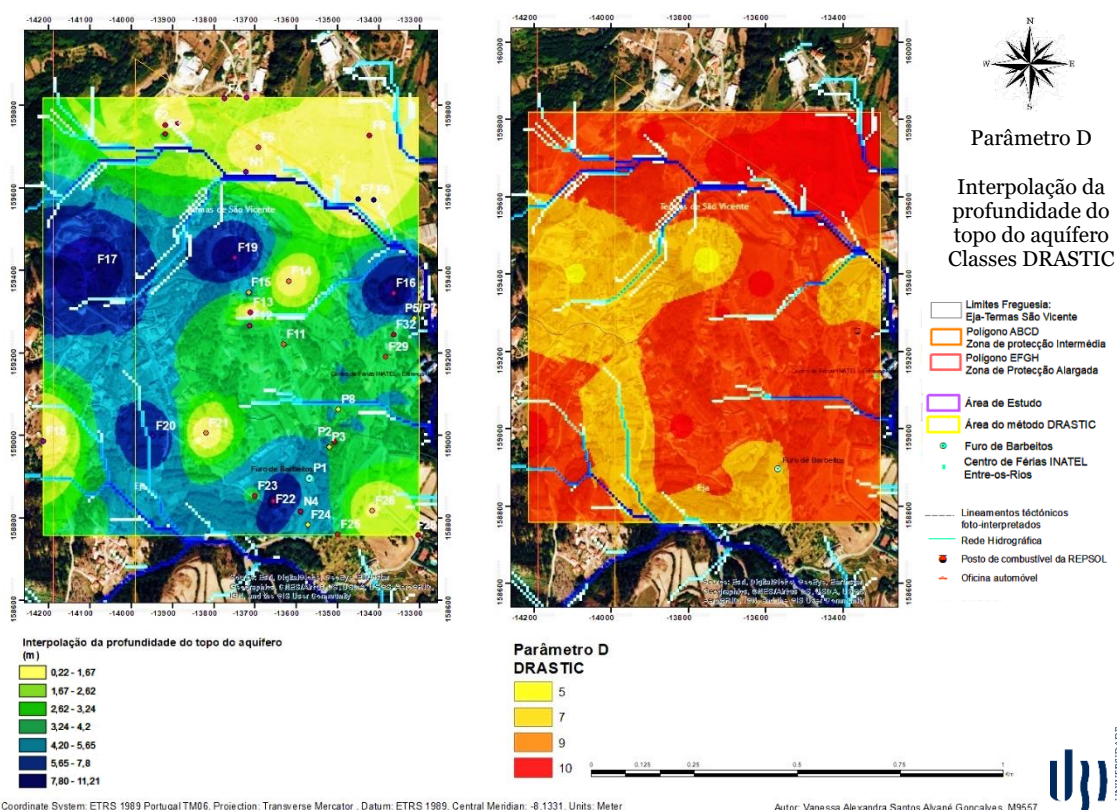
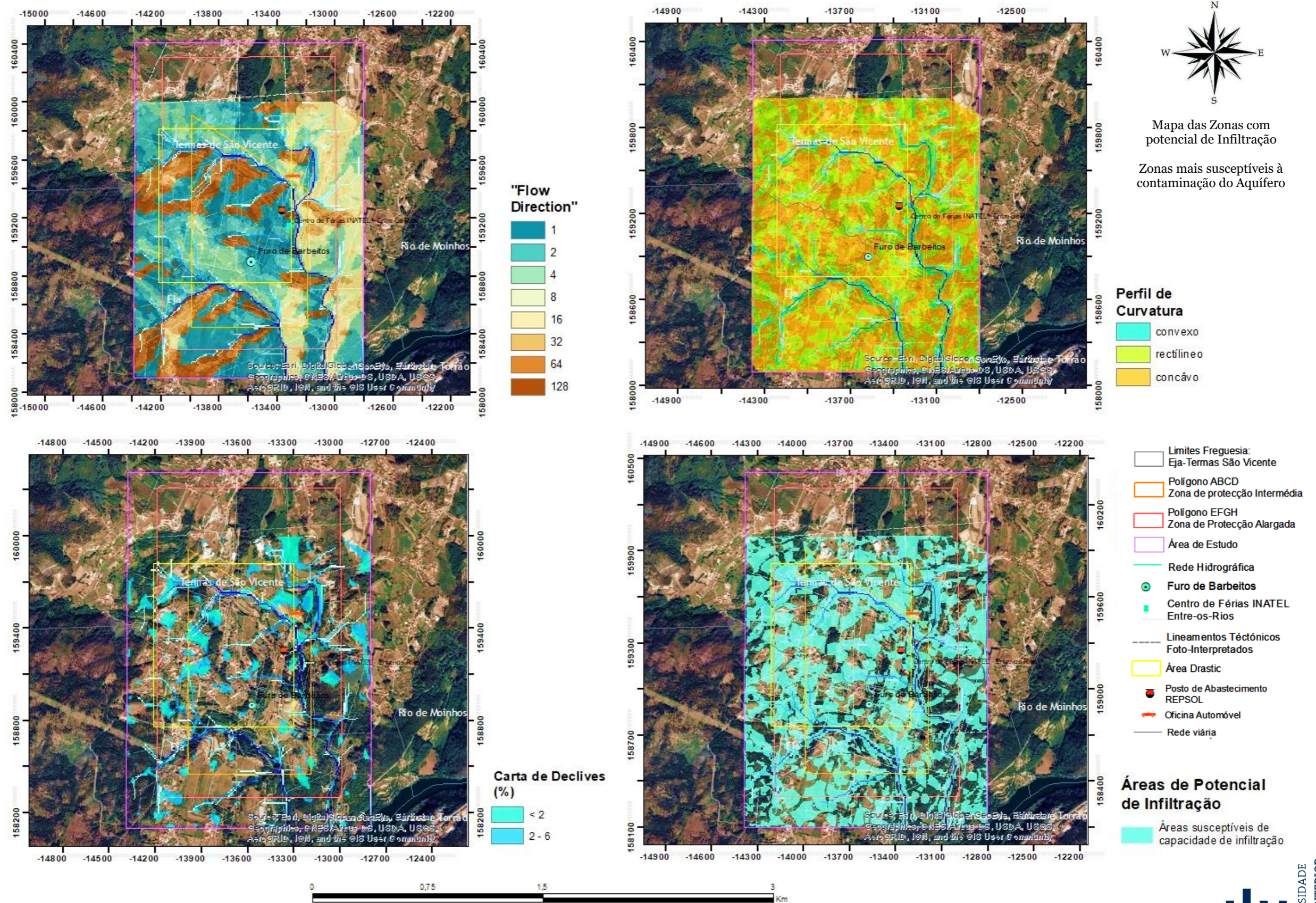


Figura 41 - Carta do Parâmetro D - Profundidade do Topo do Aquífero (dados: dados: LNEC 2008; Teixeira 2011; Fonte: Autor).

### 7.5.4.3. PARÂMETRO R – RECARGA DO AQUÍFERO

O MDT (*Model Digital Terrain*) (Figura 39) foi gerado através da informação dos pontos cotados e das curvas de nível provenientes do CIGeoE. O modelo de interpolação utilizado foi o TIN (*Triangulated Irregular Network*), e depois convertido em estrutura matricial,

permitindo a criação de variáveis como é o caso dos declives, da direcção do fluxo e do perfil de curvatura. O perfil de curvatura, indica a direcção do declive máximo e afecta a aceleração e desaceleração do fluxo através da superfície e influencia a erosão do solo e a deposição de sedimentos. Num perfil convexo (valores inferiores a 1), o fluxo é desacelerado e a espessura do solo é superior; num perfil côncavo (valores superiores a 1), o fluxo é acelerado e a espessura do solo é menor; num perfil retilíneo (valores iguais a 0), a superfície é linear. O mapa das zonas de potencial de infiltração (Figura 42) foi obtido através das áreas de declive inferior ou igual a 6%, unindo as áreas onde o perfil de curvatura é inferior ou igual a 0 e por fim as áreas que permitem infiltração (foi efectuado um buffer de 10 m na rede viária). Por fim, recorrendo à ferramenta *Reclassify*, é convertido segundo a tabela dos índices do parâmetro R, onde foi considerada uma recarga de 40 mm/ano, correspondendo ao valor de índice igual a 1 (Figura 43).

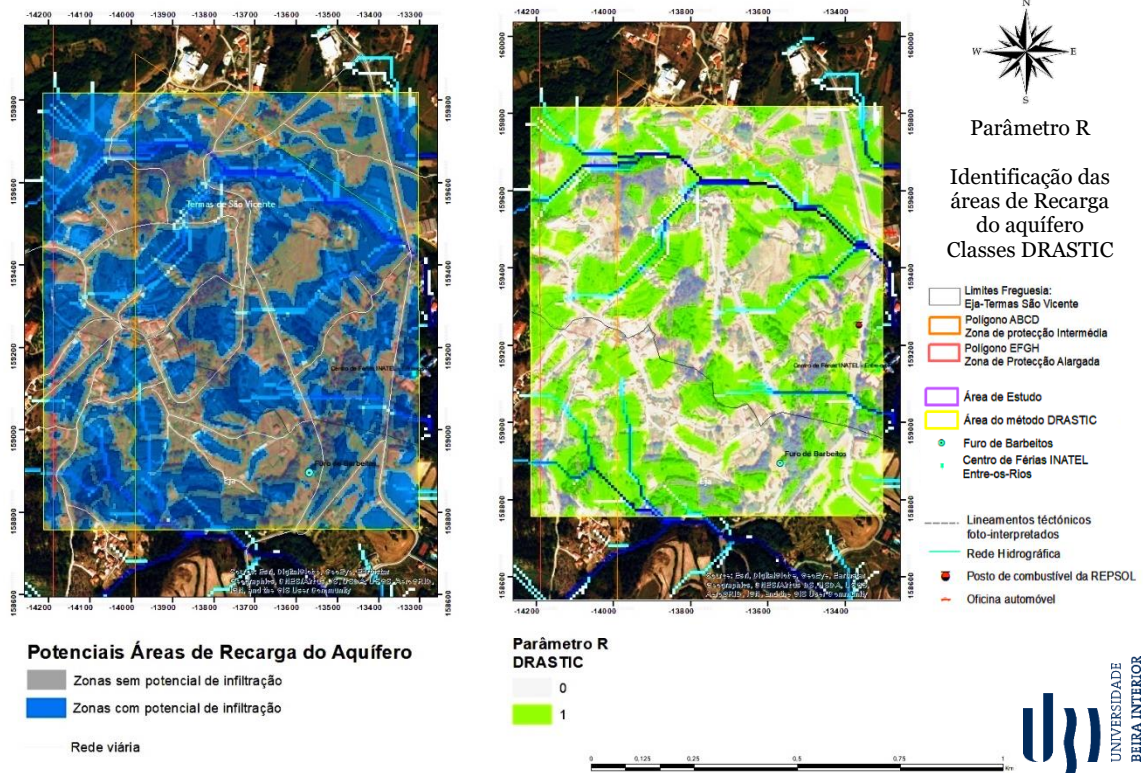


Coordinate System: ETRS 1989 Portugal TM06, Projection: Transverse Mercator, Datum: ETRS 1989, Central Meridian: -8,1331, Units: Meter

Autor: Vanessa Alexandra Santos Alvané Gonçalves, M9557



Figura 42 - Mapa Flow Direction, Perfil de Curvatura, Carta de Declives e Áreas de Potencial de Infiltração (dados: CIGeoE, Fonte: Autor).



Coordinate System: ETRS 1989 Portugal TM06, Projection: Transverse Mercator, Datum: ETRS 1989, Central Meridian: -8.1331, Units: Meter

Autor: Vanessa Alexandra Santos Alvané Gonçalves, M9557

Figura 43 - Carta do Parâmetro R – Recarga do Aquífero (dados: CIGeoE, SNIAmb, Fonte: Autor).

#### 7.5.4.4. PARÂMETRO A – TIPOLOGIA DO MATERIAL DO AQUÍFERO

A caracterização do material do aquífero foi feita a partir da informação disponível, sobre a geologia do local de estudo, na Carta Geológica de Portugal, à escala 1:500000.

Após a atribuição dos diferentes índices às litologias existentes, verifica-se a prevalência do índice 2 e 3, característica das rochas magmáticas na área de estudo (Figura 44). Observa-se uma uniformidade da litologia, no entanto, no afloramento dos microgranitos é cauteloso a atribuição de uma maior susceptibilidade, uma vez que a percolação fissural pode colocar em risco o aquífero.

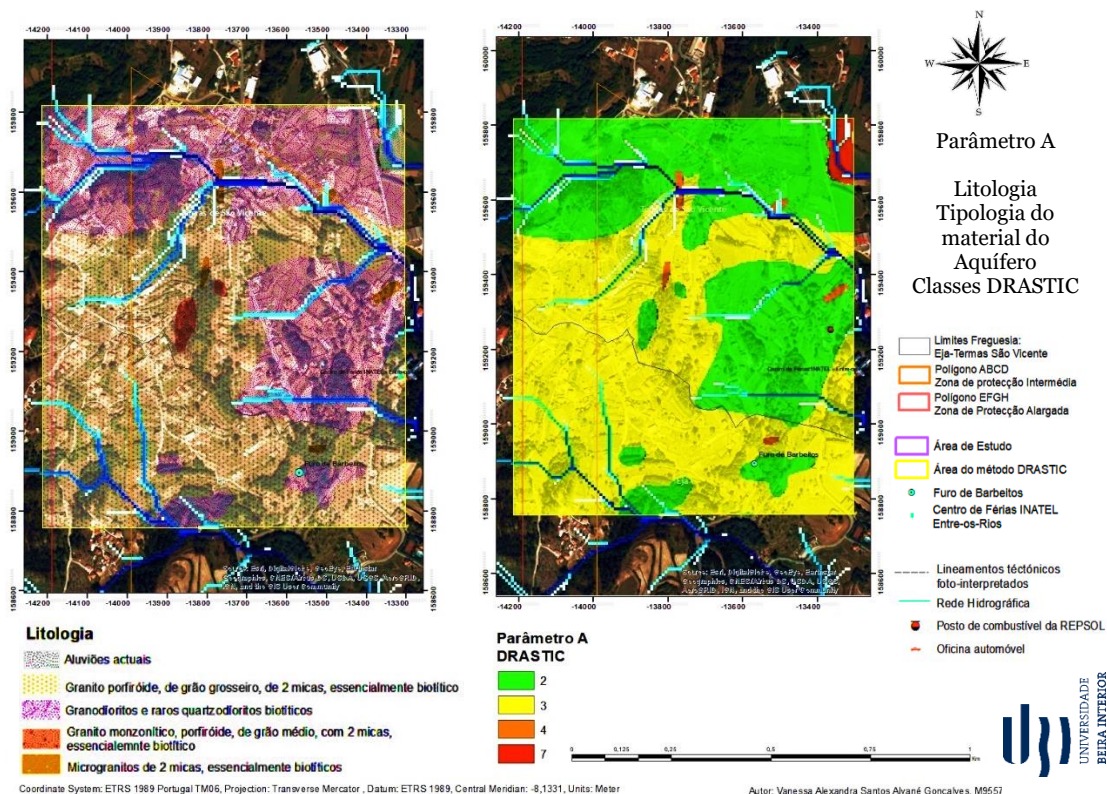


Figura 44 - Carta do Parâmetro A – Tipologia do Material do Aquífero (dados: CIGeoE, Fonte: Autor).

#### 7.5.4.5. PARÂMETRO S – TIPO DE SOLO

A atribuição de valores aos solos (Figura 45) e (Tabela 38), baseou-se na Carta dos Solos do Atlas do Ambiente, na carta FAO e na Classificação de solos do Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário de Portugal (SROA).

De acordo com as especificações técnicas da carta de uso e ocupação do Solo (COS) de Portugal continental para 2018, verifica-se a seguinte ocupação do solo no local de estudo. As áreas de tecido edificado descontínuo, são na maior parte ocupadas por edifícios e outras superfícies artificializadas. As áreas de vegetação e solo nu, ocupam uma superfície significativa, embora descontínua. A superfície impermeabilizada, ocupa uma área entre 30% e 80% da superfície total. Já as áreas de tecido edificado descontínuo esparso, a superfície impermeabilizada ocupa uma área entre 30% e 50% da superfície total. As áreas de actividade industrial, são principalmente ocupadas por construções, asfalto, alcatrão, cimento na superfície ou terra compactada.

As áreas de cultivo ocupadas por culturas temporárias de sequeiro e regadio, incluem culturas regadas, não regadas e culturas em campos inundados. Incluem também terrenos em regime de pousio até a um máximo de 5 anos. Relativamente às áreas de culturas permanentes, destacam-se as áreas com plantação de vinha, onde estão incluídas todas as áreas de vinha cuja superfície ocupada por videiras seja superior ou igual a 50%; e os pomares, onde as parcelas incluem árvores ou arbustos de uma ou várias espécies,

destinados à produção de fruto. Relativamente às áreas agrícolas heterogêneas, destacam-se as culturas temporárias e/ou pastagens melhoradas associadas a vinha. As áreas de uso agrícola nas quais ocorrem mosaicos de parcelas inferiores a 1 ha, correspondem a combinações diversificadas entre culturas temporárias de regadio, culturas temporárias de sequeiro, pastagens melhoradas e culturas permanentes. Este tipo de ocupação/uso está muitas vezes situado na proximidade de aglomerados urbanos ou rurais em resultado da produção agrícola de frutos ou legumes para consumo próprio (e.g. hortas de casas particulares). Inclui frequentemente jardins urbanos inferiores a 1 ha e edifícios dispersos correspondentes a uma impermeabilização inferior a 30%.

As áreas de Agricultura com espaços naturais e seminaturais, incluem pequenas áreas de espaços naturais com superfície inferior a 1 ha e a uma distância inferior ou igual a 60 m entre si, inseridas numa matriz de áreas agrícolas ou vice-versa, desde que tanto a proporção de espaços naturais como a proporção de áreas agrícolas, sejam entre 25% e 75%. Nos terrenos com uso florestal, as árvores originadas por regeneração natural, sementeira ou plantação, devem atingir uma altura maior ou igual a 5 metros e no seu conjunto apresentarem um grau de coberto maior ou igual a 10%. O subcoberto não é dedicado à agricultura, nem a actividades recreativas quando inseridas num contexto urbano. Estão incluídos os terrenos ocupados por árvores florestais, vivas ou mortas, resultantes de regeneração natural, sementeira ou plantação, cortes rasos, novas plantações florestais e superfícies recentemente afectadas por incêndios florestais em processo de regeneração há menos de 5 anos. Destacam-se nas florestas de folhosas, as florestas de outros carvalhos, onde as espécies dominantes são o carvalho-negral (*Quercus pyrenaica*), carvalho-alvarinho (*Quercus robur*), carvalho-português (*Quercus faginea*), ou de outros carvalhos (exceto sobreiro e azinheira); a floresta de eucaliptos, onde a espécie dominante é o eucalipto (*Eucalyptus spp.*); a floresta de outras folhosas. Das florestas de resinosas, destacam-se as florestas de pinheiro bravo, onde a espécie dominante é o pinheiro bravo (*Pinus pinaster*).

As áreas ocupadas por matos, são áreas naturais de vegetação espontânea, pouco ou muito densa, em que o coberto arbustivo (e.g. urzes, silvas, giestas, tojos, zambujeiro) é superior ou igual a 25%. Inclui olivais abandonados se inferior a 45 árvores/ha.

Os Cambissolos são solos pouco evoluídos, formados a partir de rochas não calcárias. Apresentam uma textura grosseira, acentuada acumulação de matéria orgânica, sendo que esta imprime ao solo as suas propriedades mais importantes.

A Figura 46 resume as características dos solos na área de estudo de modo a permitir caracterizar o parâmetro S no modelo DRASTIC (Figura 47).

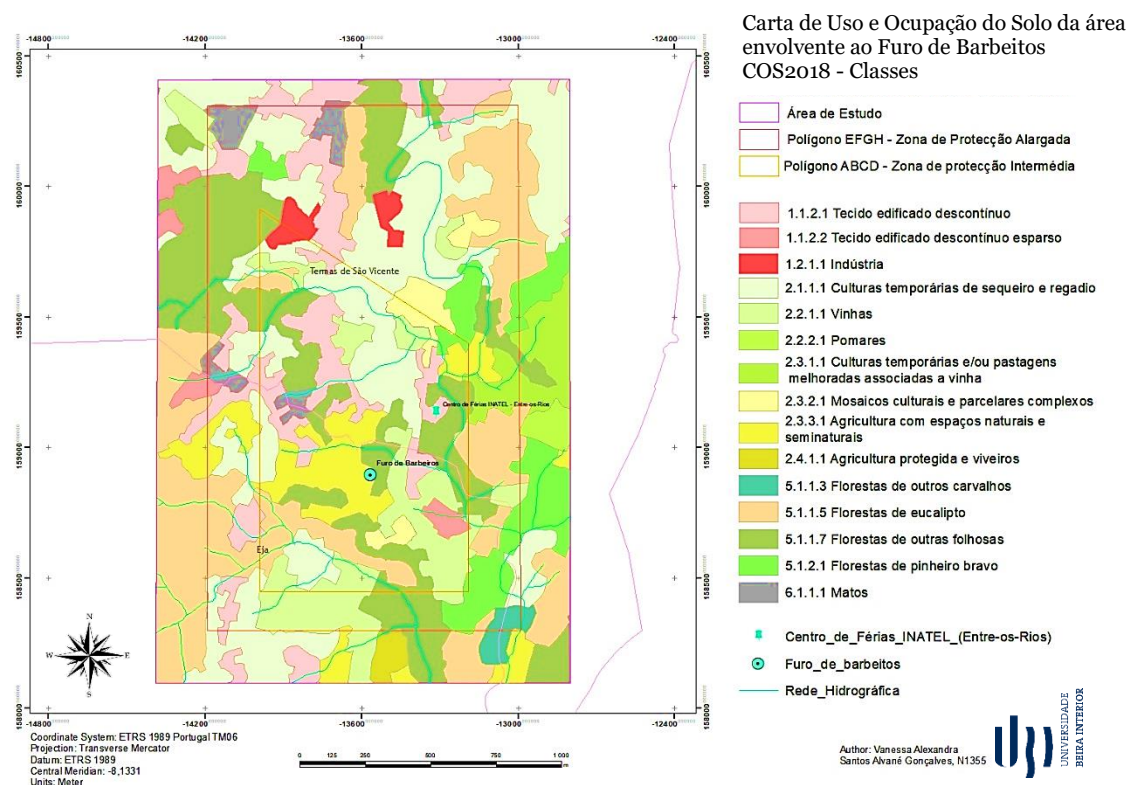
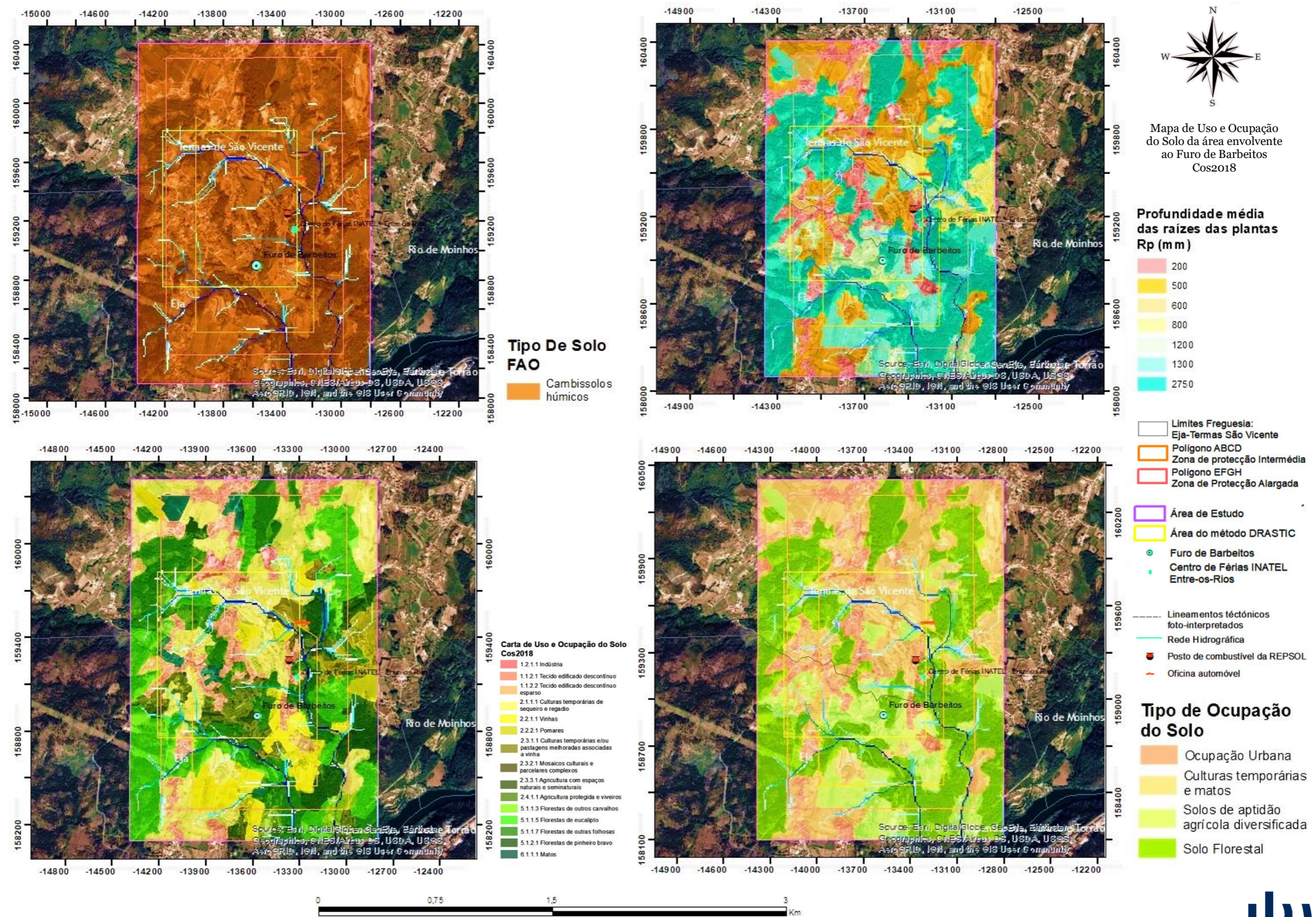


Figura 45 - Carta de Uso e Ocupação do Solo do local de estudo (dados: DGADR, COS2018; Fonte: Autor).

Tabela 37 – Tipo de Uso e Ocupação do Solo do local de estudo (de acordo com as especificações técnicas da carta de uso e ocupação do Solo (COS) de Portugal continental para 2018).

Ocupação do Solo na Área de Estudo COS2018		
	Área (ha)	%
1.1.2.1 Tecido edificado descontinuo	36,829	10,07
1.1.2.2 Tecido edificado descontinuo esparsu	4,853	1,33
1.2.1.1 Indústria	3,756	1,03
2.1.1.1 Culturas temporárias de sequeiro e regadio	82,193	22,47
2.2.1.1 Vinhas	30,160	8,25
2.2.2.1 Pomares	2,430	0,66
2.3.1.1 Culturas temporárias e/ou pastagens melhoradas associadas a vinha	10,436	2,85
2.3.2.1 Mosaicos culturais e parcelares complexos	6,541	1,79
2.3.3.1 Agricultura com espaços naturais e seminaturais	22,993	6,29
2.4.1.1 Agricultura protegida e viveiros	2,191	0,60
5.1.1.3 Florestas de outros carvalhos	2,831	0,77
5.1.1.5 Florestas de eucalipto	70,241	19,20
5.1.1.7 Florestas de outras folhosas	62,852	17,18
5.1.2.1 Florestas de pinheiro bravo	20,482	5,60
6.1.1.1 Matos	6,988	1,91
<b>Total</b>	<b>365,776</b>	<b>100</b>



Coordinate System: ETRS 1989 Portugal TM06, Projection: Transverse Mercator, Datum: ETRS 1989, Central Meridian: -8,1331, Units: Meter

Autor: Vanessa Alexandra Santos Alvané Gonçalves, M9557



Figura 46 - Mapa do Tipo de Solo, Profundidade média das raízes das Plantas, Carta do Tipo de Uso e Ocupação do Solo da Área de estudo (dados: DGADR, COS2018; Fonte: Autor).

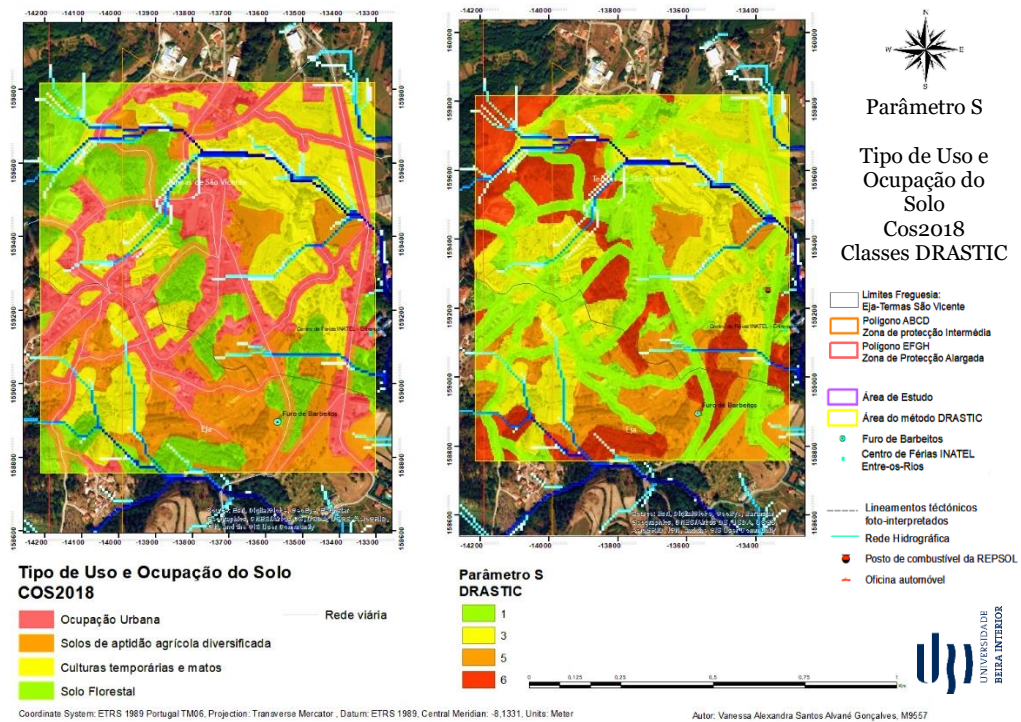


Figura 47 – Carta do Parâmetro S – Tipo de Solo (dados: DGADR, Fonte: Autor).

O Parâmetro S revela que o solo florestal, assim como as culturas temporárias e matos, apresentam maior vulnerabilidade à poluição.

#### 7.5.4.6. PARÂMETRO T – TOPOGRAFIA

O local de estudo em termos altimétricos, varia entre os 20 m e os 250 m, contendo variações de declives acentuadas. O MDT (Modelo Digital de Terreno) (Figura 48) onde se insere o local de estudo, permitiu a elaboração da carta de Declives (%), que posteriormente foi classificada em 5 classes tendo em conta a sua integração no método DRASTIC (Figura 49). O índice de vulnerabilidade é maior em zonas de baixos declives, uma vez que a infiltração de poluentes é favorecida.

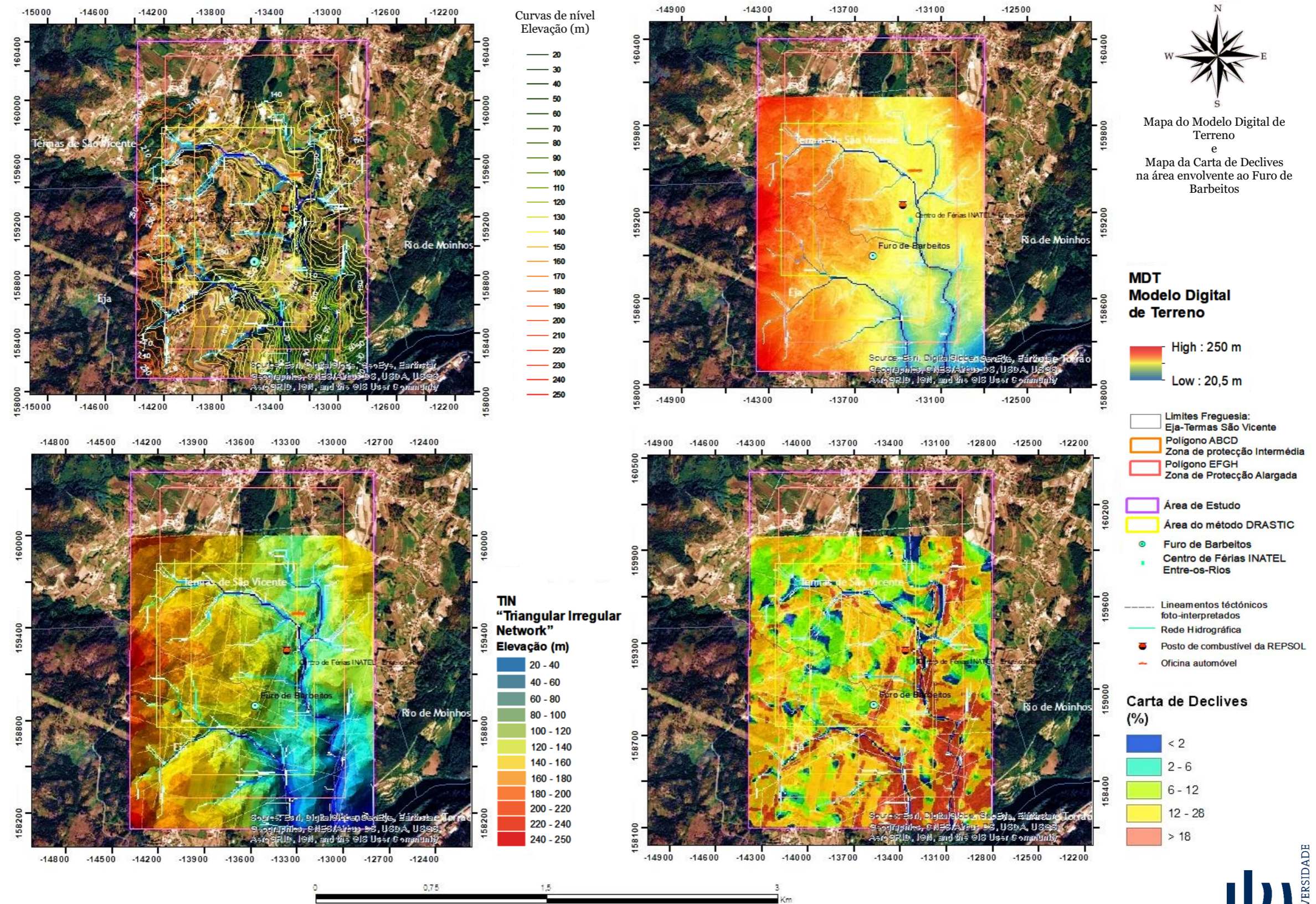


Figura 48 - Mapa do Modelo Digital de Terreno e Carta de Declives da área envolvente ao Furo de Barbeitos (dados: CIGeoE, Fonte: Autor).

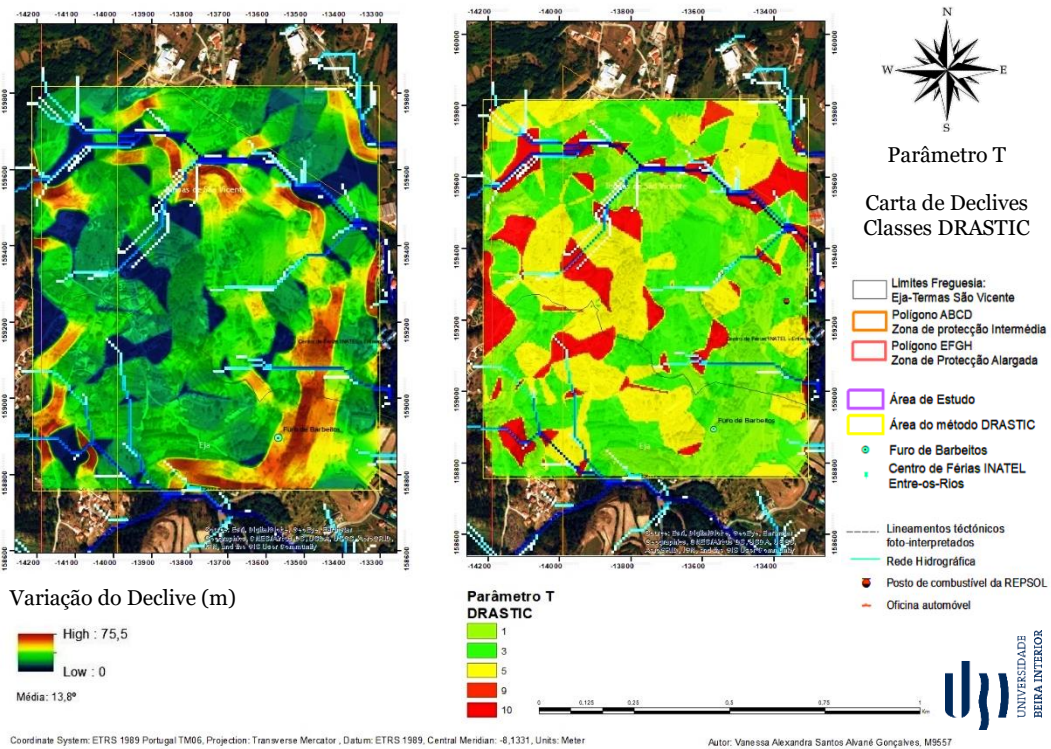


Figura 49 - Carta do Parâmetro T – Topografia (dados: CIGeoE, Fonte: Autor).

#### 7.5.4.7. PARÂMETRO I – IMPACTO DA ZONA NÃO SATURADA/VADOSA

O cálculo dos valores a atribuir ao parâmetro I (Figura 50), assim como o Parâmetro A, teve por base as características da litologia da área de estudo, presentes na Carta Geológica de Portugal à escala 1:500000 e na descrição litológica da notícia explicativa da mesma.

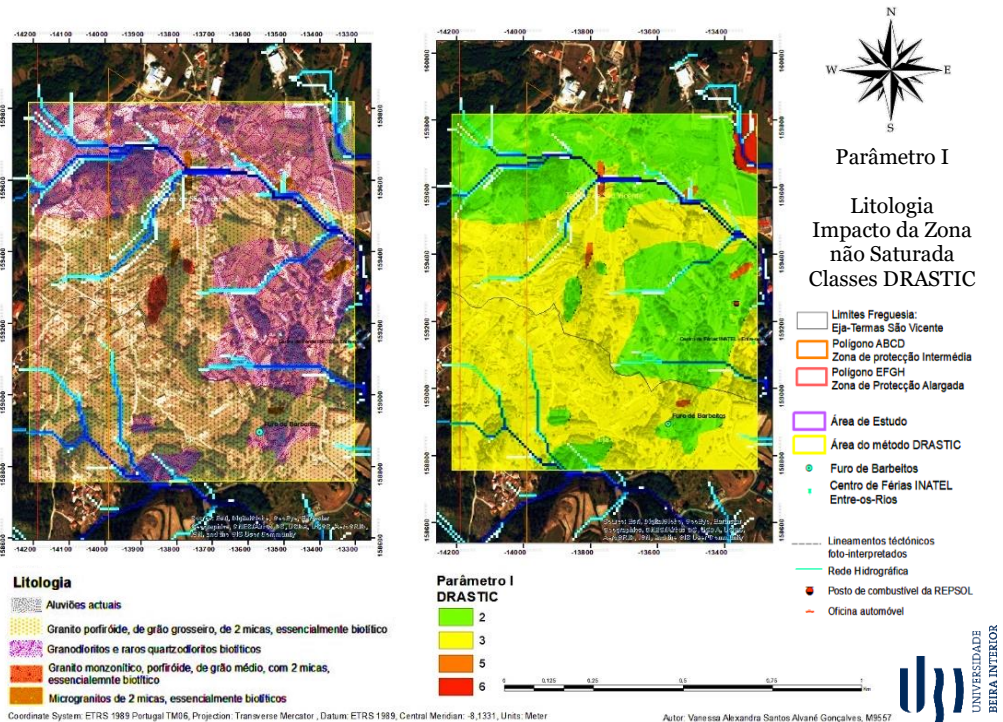


Figura 50 - Carta do Parâmetro I – Impacto da Zona não Saturada/vadosa (dados: Teixeira 2011, Fonte: Autor).

### 7.5.4.8. PARÂMETRO C – CONDUCTIVIDADE HIDRÁULICA DO AQUIFERO

As variáveis a integrar no método DRASTIC provenientes da geologia, foram vectorizadas e a cada polígono foi atribuído a sua classe litológica e hidrogeológica. Para o cálculo da condutividade hidráulica, foram utilizados os valores de ensaios de quantificação com valores médios de K apresentados por LNEC (2008), e também o ábaco (Tabela 5) de Singhal & Gupta (2010), que relaciona a litologia com a condutividade hidráulica. Relativamente à porosidade foram utilizados os valores da Tabela 3, que têm como base os valores de porosidade dos meios geológicos de Lencastre e Franco (1992). A Figura 51 apresenta a classe DRASTIC para o parâmetro C.

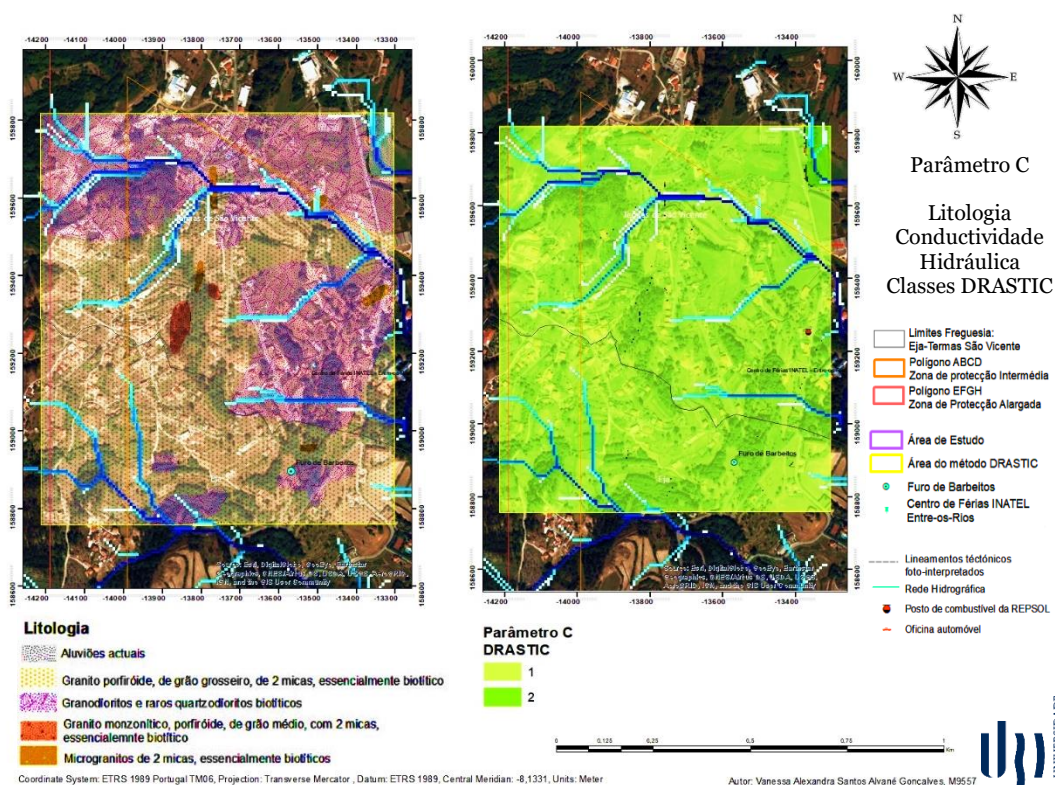


Figura 51 - Carta do Parâmetro C – Conductividade Hidráulica do Aquífero (dados: Teixeira 2011, Fonte: Autor).

## 7.6. RESULTADOS

O Índice DRASTIC (Aller et al., 1987), permitiu a avaliação de vulnerabilidade do aquífero, através da elaboração da Carta de vulnerabilidade DRASTIC. Na tabela 39 estão resumidos todos os valores atribuídos a cada parâmetro, consoante as condições hidrogeológicas, hidrodinâmicas e topográficas do local de estudo. A Figura 52 representa o Mapa da Vulnerabilidade à Poluição do Aquífero de Entre-os-Rios, com identificação de Zonas com maior susceptibilidade.

Tabela 38 - Resumo dos valores atribuídos a cada parâmetro do índice DRASTIC do local de estudo.

Parâmetros	Características	Índice	Peso	Total
Profundidade da água	3,9 m (média)	5 - 10	5	25 - 50
Recarga por infiltração	Recarga profunda	0 - 1	4	0 - 4
Características do aquífero	Permeabilidade	2 - 7	3	6 - 21
Características do solo	Zonas de alteração (inferior a 2m)	1 - 6	2	2 - 12
Topografia	Carta de declives	1 - 10	1	1 - 10
Impacto da zona vadosa	Litologia da Zona não saturada	2 - 6	5	10 - 30
Conductividade hidráulica	capacidade de transmitir água	1 - 2	3	3 - 6
<b>Total - informação de acordo com Mapa da Vulnerabilidade DRASTIC</b>				<b>67 - 127</b>

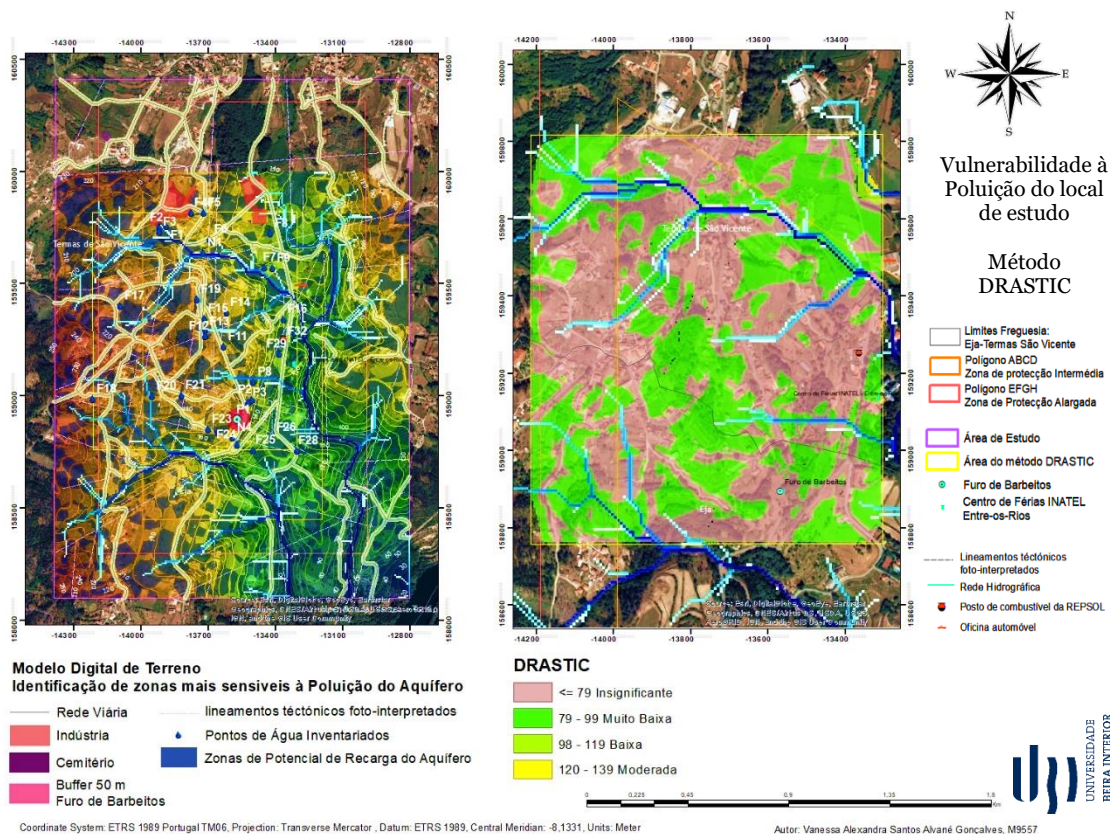


Figura 52 - Mapa da Vulnerabilidade à Poluição do Aquífero de Entre-os-Rios, com identificação de Zonas com maior susceptibilidade (dados: CIGeoE, DGADR, COS2018, SNIAmb, Teixeira 2011; Fonte: autor).

Sendo o valor mínimo obtido para o índice DRASTIC de 47 e o máximo de 127, sugere uma vulnerabilidade à poluição média de 79, variando de insignificante a moderada para poluentes “normais”. A zona ocupada pelas aluviões possui uma vulnerabilidade à poluição moderada, no entanto encontra-se relativamente distante da captação. As zonas ocupadas pelos microgranitos e onde ocorre a infiltração de águas meteóricas ao longo de sectores preferenciais de recarga ligados hidraulicamente à fracturação profunda, representam uma vulnerabilidade moderada devido às condições a que estão sujeitas. Já as zonas de vulnerabilidade baixa, podem corresponder a zonas onde o maciço granítico se encontra pouco alterado, no entanto também poderá comprometer a qualidade do recurso hidromineral de Entre-os-Rios. O local de estudo insere-se numa zona declivosa demarcada

por afloramentos graníticos, onde a baixa vulnerabilidade à poluição é espectável. No entanto a fracturação como já referido, poderá transportar os poluentes até profundidades e/ou distâncias consideráveis.

Relativamente aos possíveis focos de poluição já referidos anteriormente, é necessário monitorizar locais de ocupação humana que se localizem a cotas mais elevadas, ausência de saneamento básico a montante da captação e o uso ponderado de fertilizantes e pesticidas. As zonas identificadas com potencial de recarga do aquífero em conjunto com as linhas de escorrência e direcção do fluxo das águas pluviais permitem assinalar zonas mais susceptíveis.

O risco de poluição engloba a vulnerabilidade e a existência de focos de poluição, sendo que no local de estudo onde se localiza a captação, o enquadramento ambiental é razoável. O índice DRASTIC revela, no entanto, algumas fragilidades como é o caso na redundância devido à introdução de três parâmetros relativos às características geológicas do aquífero (Ribeiro, 2005) e na subjectividade inerente à conversão de escalas físicas na escala de 10 categorias (Carvalho, 2013). A definição dos perímetros de protecção (Figura 53), através da aplicação de diferentes metodologias permite que seja possível preservar o recurso hidromineral a longo prazo da sua qualidade.

De acordo com a Legislação Portuguesa, a área de protecção para um recurso hidrotermal, divide-se em três zonas distintas: imediata, intermédia e alargada.

Para a zona imediata, propõe-se um raio de 50m, sendo o centro do círculo, a captação de água mineral. O valor do raio é justificado por se tratar de um sistema aquífero cujo suporte litológico é constituído por formações ígneas, variando de muito alteradas a pouco alteradas. Abrange uma área de 0,785 ha, sendo que esta área deverá ser totalmente vedada a qualquer intruso e deverá permanecer sempre limpa. Fica expressamente proibido: a construção de qualquer espécie; sondagens e trabalhos subterrâneos; a realização de aterros, desaterros ou outras operações que impliquem ou tenham como efeito modificações no terreno; a utilização de adubos orgânicos ou químicos, insecticidas, pesticidas ou qualquer outro produto químico; o despejo de detritos, desperdícios e a constituição de lixeiras; a realização de trabalhos de condução, tratamento ou recolha de esgotos. Fica ainda condicionada a previa autorização das entidades competentes da Administração, a demolição de construções de qualquer espécie, o corte de árvores e arbusto, e a destruição de plantações.

A delimitação da zona intermédia está relacionada com os parâmetros geológico-estruturais, hidrogeológicos e da vulnerabilidade à poluição. Possui uma área de 96,6 ha, de encontro à área da concessão. A sua função é a protecção do recurso a interferências directas sobre o mecanismo local de emergência, nomeadamente a fracturação orientada a N e potencialmente a ENE e NNE. Na zona intermédia são proibidas as actividades referidas

na zona imediata, salvo quando devidamente autorizadas pela entidade competente da Administração, não resultando qualquer interferência no recurso ou dano na exploração.

Por sua vez, a zona de protecção alargada possui uma área de 241,8 ha e os limites foram definidos com o objectivo de incluir os sectores preferenciais de recarga ligados hidraulicamente à fracturação profunda. A fracturação N-S e NE – SW, é responsável pela circulação favorável do sistema aquífero em estudo. Esta zona tem como finalidade evitar o surgimento de focos de contaminação, de forma a prevenir eventuais escorrências superficiais e sub-superficiais de poluentes. Na zona alargada, por despacho Ministerial, poderão ser proibidas as actividades referidas anteriormente, quando estas representem riscos de interferência ou contaminação para o recurso.

A utilização do método do raio fixo calculado é relativamente simples. Por outro lado, os resultados são pouco precisos, uma vez que considera um número de parâmetros reduzido, facilitando a definição de zonas sobrestimadas a jusante e subestimadas a montante. Os métodos analisados revelaram sempre valores muito inferiores aos perímetros de protecção do enquadramento legal, no entanto foi definido um raio de 350 m e 650 m para comparação de resultados no local de estudo.

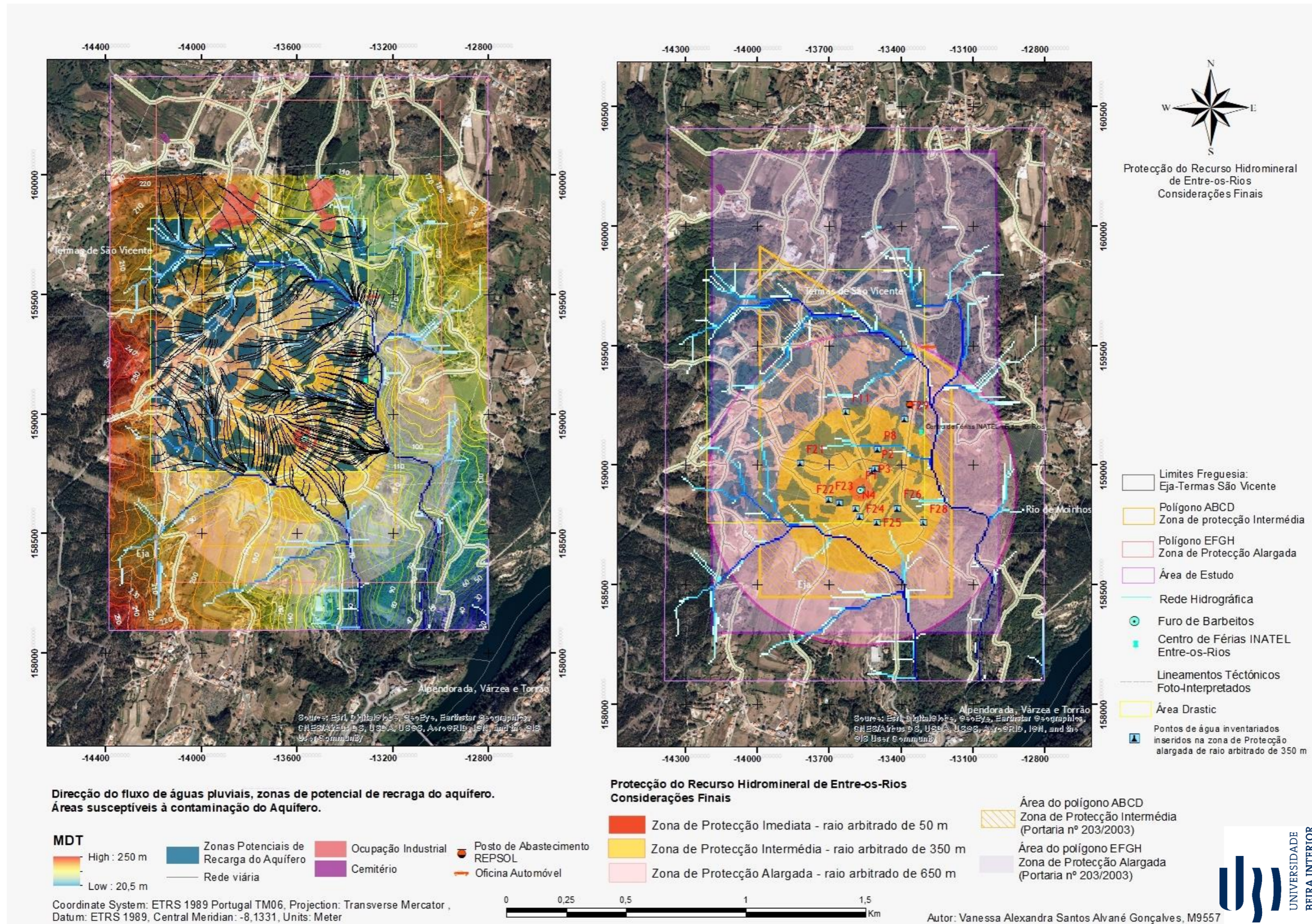


Figura 53 - Mapa das considerações finais das Zonas de Protecção do Aquífero de Entre-os-Rios (dados: CIGeoE, DGADR, COS2018, SNIAmb, Teixeira 2011; Fonte: autor).

## 7.7. CONCLUSÕES

A protecção de águas subterrâneas é de extrema importância para salvaguardar os recursos naturais. É necessário tomar consciência que é imprescindível evitar e controlar a contaminação das águas subterrâneas. A Legislação aplicável, permite que sejam adoptadas e corrigidas estratégias de gestão do recurso, assentes em critérios, objectivos, métodos e técnicas adequadas. Deve ter-se em consideração que a água subterrânea está sempre de algum modo sob risco, devido às actividades antropogénicas. A delimitação de perímetros de protecção é até ao momento, o modo mais eficaz de efectuar essa prevenção.

A elaboração desta dissertação permitiu a determinação da vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas na envolvente do Furo de Barbeitos através do cálculo do índice DRASTIC. Pretendeu-se também contribuir para o aprofundamento do conhecimento da hidrogeologia dos recursos hídricos em Portugal, em particular um recurso hidromineral de uma região com algum potencial reconhecido.

Os trabalhos desenvolvidos adoptaram sempre uma perspectiva na área do domínio das Geociências, mas também no domínio da Engenharia, Economia e Ordenamento do Território. A análise de estudos anteriores do recurso hidromineral de Entre-os-Rios, permitiu gerar novas cartas de vulnerabilidade à poluição do aquífero. A carta de vulnerabilidade, revela que se trata de uma zona onde a vulnerabilidade é baixa. Esta situação está relacionada com as características da geologia da região que tendem a dificultar a infiltração de possíveis elementos poluentes. Por sua vez, a região é caracterizada por uma densidade populacional relevante, em uma área de declives acentuados e com uma ocupação de solo altamente diversificada, justificando assim as áreas de protecção sobrestimadas. A agricultura que se pratica no local de estudo, devido às suas práticas agrícolas, pode também ser responsável pela contaminação do aquífero. Apesar de uma possível contaminação na zona de estudo não ser expectável, é necessário assumir que o risco existe. É altamente recomendável a tomada de medidas preventivas em função dos resultados obtidos.

A forma mais adequada de protecção dos aquíferos à poluição, é a definição dos perímetros de protecção da captação de água subterrânea através da aplicação da metodologia que mais se adequa ao caso de estudo, exemplo o raio fixo calculado, adaptado da Legislação Portuguesa. A sua definição é importante para preservar o recurso a longo prazo, da sua quantidade e qualidade, contribuindo para a melhoria das condições de saúde da população. No entanto, definir áreas de interdição a determinados usos não é suficiente, é necessário que estas áreas sejam monitorizadas para detecção de poluentes que possam eventualmente ser transportados na corrente do fluxo subterrâneo. Na impossibilidade de interditar todas as actividades com a perfeita preservação do aquífero, é imprescindível que dentro das áreas

definidas na legislação, as actividades sejam completamente compatíveis com a preservação do recurso hidromineral.

Apesar de as zonas se encontrarem sobredimensionadas é importante considerar a heterogeneidade do meio subterrâneo da área de estudo, a possibilidade de escoamento preferencial através de fracturas para as zonas envolventes da captação e a incerteza associada à aplicação de métodos como resultado da indeterminação de alguns parâmetros hidráulicos. Foram também identificadas possíveis fontes de contaminação, actividades e instalações que podem comprometer a protecção do recurso na zona de protecção intermédia e alargada, actividades essas que são interditas no interior dos perímetros de protecção, contrariando o propósito da sua delimitação.

Por fim, conclui-se que os métodos expostos pelos diferentes autores, por si só, não são completamente adequados ao local de estudo, pelo facto de cada método possuir as suas próprias limitações. A Lei de Darcy ao considerar apenas o escoamento natural sem a ocorrência de extracções, define períodos muito superiores aos definidos na lei (50 dias e 3500 dias para as zonas intermédia e alargada, respectivamente) para que sejam percorridas as distâncias em causa. O método do raio fixo calculado assume na dimensão da zona de protecção intermédia actualmente definida, tempos de propagação muito superiores a 50 dias, tanto a montante como a jusante do Furo. O mesmo acontece na zona de protecção alargada, onde os tempos de propagação são muito superiores a 3500 dias. Por outro lado, o dimensionamento da zona de protecção intermédia (41,5 m) e alargada (347 m) são demasiado pequenas, tendo em conta as características de alteração e de fracturação do aquífero existentes na área de estudo. Também no método de Krijgsman e Lobo-Ferreira resultam valores inferiores às actuais dimensões da zona intermédia a jusante do Furo. Apesar do método do raio fixo calculado não considerar o gradiente hidráulico, conduzindo a zonas de protecção circulares centradas na captação e sobrestimadas a jusante e subestimadas a montante, foram definidos raios circulares 50 m para a zona imediata, 350 m para a zona intermédia e 650 m para a zona alargada.

As medidas de protecção das águas subterrâneas devem ter em consideração a vulnerabilidade do aquífero, em função das suas características hidrogeológicas e dos riscos de contaminação efectivos ou potenciais associados às actividades humanas. Neste contexto, os SIG possuem ferramentas de elevado potencial de processamento e análise de dados georreferenciados e criação de Sistemas de Apoio à Decisão. Esta dissertação compreende a importância que os SIG assumem especificamente nas áreas das Geociências e do Ambiente, revelando modernas ferramentas de gestão e ordenamento do território. Por sua vez, possuem a capacidade de reprodução cartográfica, com a elaboração de cartas de vulnerabilidade específica à poluição de aquíferos.

## 7.8. PRINCIPAIS LIMITAÇÕES EVIDENCIADAS E PERSPETIVAS FUTURAS

Como já referido anteriormente, a principal dificuldade deveu-se à falta de dados georreferenciados. Não foi possível interpolar uma área DRASTIC suficientemente grande, no entanto as características relativamente homogéneas do local de estudo, permitiram a utilização do método. É necessária uma maior densidade de amostragens de águas subterrâneas em zonas de maior susceptibilidade na avaliação da vulnerabilidade do recurso. Como perspectivas futuras, seria pertinente a criação do modelo de avaliação à vulnerabilidade do recurso em ModelBuilder e criação de uma rede de monitorização, de modo a controlar os pontos de águas existentes como mecanismo de prevenção a possíveis contaminações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agüero V. J., Pujol M. R. (2000). *Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica*. Ponencia VII Conferencia Anual Latinoamericana de Usuarios ESRI /Erdas y VI Conferencia Internacional de Topografía. Geotecnologías y Colegio de Ingenieros Topógrafos, San José, Costa Rica
- Albinet, M., Margat, J. (1970). *Cartographie de la vulnérabilité a la pollution des nappes d'eau souterraine*, Bull. BRGM 2me Series 3 (4).
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H. e Petty, R.J. (1987). *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. EPA Report 600/2-85/018, USA.
- Al-Zabet, T. (2002). *Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method*. Env. Geol. 43:203 – 208, doi 10.1007/s00254-002-0645-5.
- APIAM (2017). *O Livro Branco Águas Minerais Naturais e Águas de Nascente de Portugal*. Lisboa: Associação Portuguesa dos Industriais de Águas Minerais Naturais e de Nascentes.
- Artuso, E., Oliveira, M. M., Lobo-Ferreira, J.P. (2002, June). *Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution using six different Methods: AVI, GOD, DRAS- TIC, SI, EPPNA and SINTACS. Application to the Évora Aquifer*. LNEC: Rel. 184/02-GIAS.
- Auge, M. (2004). *Vulnerabilidad de acuíferos, Conceptos y métodos*. Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Dirección de Geología Regional y Aplicada, Buenos Aires.
- Brassington, R. (2007). *Field hydrogeology*. The geological field guide series. John Wiley & Sons.
- Calado, C. (1995). *Notícia Explicativa da Carta de Nascentes Minerais do Atlas do Ambiente*. Direcção - Geral do Ambiente e Recursos Naturais. Lisboa.
- Calado, C. (2001). *A ocorrência de água sulfúrea alcalina no Maciço Hespérico: quadro hidrogeológico e quimiogénese*. Tese de Doutoramento. Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Calado, C., Almeida, C. (1993, Novembro). *Geoquímica do Flúor em Águas Minerais da Zona Centro Ibérica*. In F. Noronha, M. Marques & P. Nogueira (eds.), Comunic. IX Semana de Geoquímica e II Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa. FCUP, Porto.
- Carrillo, J.L.P. (1978). *Hidrogeologia Practica*. Urmo, S.A. de Ediciones.
- Carter, G.S., Shankar, U. (1997). *Creating Bathymetry Grids for Environmental Numerical Modelling of Gravel-bed Rivers*. Application Math. Modelling, 21, pp. 699-708.
- Carvalho, J. M. (2006). *Prospecção e pesquisa de recursos hídricos subterrâneos no Maciço Antigo Português: linhas metodológicas*. (Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro). <http://hdl.handle.net/10773/5016>.
- Carvalho, J. M., Amador, F. (2001). *Águas subterrâneas: uma abordagem metodológica*. Cadernos Didácticos de Ciências.
- Carvalho, J. M., Plasencia, N., Chaminé, H. I., Rodrigues, B.C., Dias, A.G., Silva, M.A. (2000) *Recursos hídricos subterrâneos em formações cristalinas do Norte de Portugal*. in AIH-Grupo Español & APRH (ed.), Jornadas Hispano-Lusas sobre 'Las Águas Subterrâneas en el Noroeste de la Península Ibérica'. A Coruña, Madrid, Textos de las Jornadas, Mesa Redonda y Comunicaciones, pp. 163-171.
- Carvalho, P. E. M., Cavaleiro, V. M. P. (2000). *Área de Protecção do Recurso Hidromineral das Termas de Entre-os-Rios*. 1<sup>st</sup> Joint World Congress on Groundwater.
- Cavaco, A. (1987). *Estudo Hidrogeológico das Caldas de Entre-os-Rios*. Sondagens e Fundações A. Cavaco Lda, Lisboa. (Relatório Inédito).
- Cavaco, A. (1989). *Estudos e prospecções para captação e aumento de caudais de Água Sulfurosa e potável no Centro do INATEL em Entre-os-Rios*. Sondagens e Fundações A. Cavaco Lda, Lisboa. (Relatório Inédito).

- Cavaco, A. (1990). *Furos de pesquisa e eventual captação de água mineral no Centro do INATEL em Entre-os-Rios*. Sondagens e Fundações A. Cavaco Lda, Lisboa. (Relatório Inédito).
- Civita, M., Maio, M., Farina, M., Zavatti, A. (2001). *Linee-guida per la redazione e l'uso delle carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento*. ANPA - Dipartimento Stato dell'Ambiente, Controlli e Sistemi Informativi, pp.15-28.
- Cortez, J. A. S. (2012). *Noções elementares de Hidrogeologia*. Cap. V do livro Águas Minerais Naturais e de Nascente da Região Centro. Coordenador José A. Simões Cortez, Ed. Mare Liberum, FEDRAVE, Aveiro, pp: 93-105.
- Cruz, F. F. (2014). *Delimitação de Áreas Estratégicas de Protecção e Recarga de Aquíferos no âmbito da Reserva Ecológica Nacional, com recurso a funcionalidades de um SIG*. Revista Lusófona de Arquitectura e Educação, 0(10), 091–114.
- Cruz, J. (1997). *Objectivos e critérios para a elaboração das propostas de fixação dos perímetros de protecção*. Preservação da qualidade das águas minerais naturais e águas das nascentes, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, p30-46.
- Custódio, E., Lamas, M. R. (2001). *Hidrología subterránea*. Segunda edición corregida. Ediciones Omega, SA, Barcelona.
- Darcy H. (1856). *Les fontaines publiques de la Ville de Dijon*. Victor Dalmont, Paris.
- Desmond M., Pedretti, C. (2000). *The Codex Leicester – Notebook of a genius*. Powerhouse Museum Publishing, Sidney.
- DGT. (2019). *Especificações técnicas da Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS) de Portugal Continental para 2018*. Relatório Técnico. Direcção Geral do Território.
- Diário da República. (1990). *Decreto-Lei n.º 86/90 de 16 de Março do Diário da República n.º 63, I Série*. Regulamento de Águas Minerais Naturais.
- Diário da República. (1990). *Decreto-Lei n.º 90/90 de 16 de Março do Diário da República n.º 63, I Série*. Disposições Gerais.
- Diário da República. (1999). *Decreto-Lei n.º 382/99 de 22 de Setembro do Diário da República n.º 222, I Série*. Delimitação de Perímetros de Protecção de captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público.
- Diário da República. (2003). *Portaria n.º 203/2003 de 7 de março do Diário da república n.º 56/2003, Série I-B*. Fixa o perímetro de protecção da água mineral natural a que corresponde o número HM-23 de cadastro e a denominação de Entre-os-Rios (Quinta da Torre).
- Diário da República. (2007). *Decreto-Lei n.º 306/2007 de 27 de Agosto do Diário da República n.º 164, I Série*. Transposição da Directiva Comunitária n.º 98/83/CE.
- EEA. (2004). *Impacts of Europe's changing climate – An indicator-based assessment*. EEA Report – No. 2/2004.
- EPA. (1993). *Wellhead Protection in Confined, Semi-Confined, Fractured, and Karst Aquifer Settings*. Office of Water, EPA.
- EPPN, A. (1998). *Informação Cartográfica dos Planos de Bacia. Sistematização das Figuras e Cartas a Imprimir em Papel*. Equipa de Projecto do Plano Nacional da Água.
- Feitosa, F. A. C., Filho, J. M. (2000). *Hidrogeologia. Conceitos e Aplicações*. 2ª edição. Serviço Geológico do Brasil.
- Feitosa, F. A. C., Manoel, F.J. (1997). *Hidrogeologia: – Conceitos e Aplicações*, CPRM, Fortaleza.
- Fernandes, P. A. J. (2003). *Modelação espacial da Erosão numa Rampa de Rega Rotativa – Modelo WEPP*. (Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa).
- Ferreira da Silva, A. J. (1909). *As águas minerais de Entre-os-Rios (Estância da Torre): memória e estudo químico e bacteriológico*. Typographia a vapor da Empresa Guedes (Edição do autor), Porto.
- Ferreira, J., Brito, A., Silva, A. R. da, Sampaio, J., Tavares, T., Soares, A. S., Pinto, A. (2012). *Manual de Boas Práticas para Execução e Exploração de Furos de Captação de*

- Águas Subterrâneas*. Instituto Português da Qualidade, Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Águas. ISBN 978-972-763-132-2.
- Ferreira, M. R. N. (2013). *Evolução hidrogeoquímica das águas sulfúreas de Entre-os-Rios: avaliação preliminar*. (Tese de Mestrado, Departamento de Geotecnia, Instituto Superior de Engenharia do Porto).
- Feseker, T., Lobo-Ferreira, J.P. (2001). *Delineation of Wellhead Protection Zones – A Simplified Approach*, Coastin A Coastal Policy Research, New Delhi.
- Fetter, C.W. (2001). *Applied hydrogeology*. 3rd Editions. Prentice-Hall, USA.
- Foster, S. S. D. (1987). *Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy*. International Conference on Hydrological Research, Netherlands.
- Foster, S., Hirata, R. (1988). *Groundwater pollution risk evaluation: a methodology based on available data*. CEPIS/PAHO Technical Report Lima/Peru.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., Paris, M. (2002). *Quality Protection: A Guide for Water Service Companies, Municipal Authorities and Environment Agencies*. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, Washington.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., Paris, M. (2006). *Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Service Companies, Municipal Authorities and Environment Agencies*. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Servimar – Serviços Técnicos Ambientais Ltda, Brasil.
- Francés, A., Paralta, E., Fernandes, J., Ribeiro, L. (2001). *Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agriculture pollution: the susceptibility index*. Third International Conference on Future Groundwater Resources at Risk, GeoSystem Center IST, Lisboa.
- Gómez, M. (1998). *Caracterização da Vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação dos aquíferos. Aplicação dos índices DRASTIC e GOD*. Curso sobre contaminação de Solos e Águas Subterrâneas, Centro de Estudos e Experimentação de Obras Públicas, Madrid.
- Goodchild, M. F., Proctor, J. D., Wright, D. J. (1997). *Demystifying the Persistent Ambiguity of GIS as "Tool" Versus "Science"*. The Annals of the Association of American Geographers, 87(2), pp.346-362.
- Haertle, A. (1983). *Method of working and employment of EDP during the preparation of groundwater vulnerability maps*. IAHS Publ. 142(2).
- IGM. (1998). *Recursos Geotérmicos em Portugal Continental: baixa entalpia*. Instituto Geológico e Mineiro, Ministério da Economia, Lisboa.
- IGM. (1999). *Preservação da Qualidade das Águas Minerais naturais e Águas de Nascente*. Instituto Geológico e Mineiro, Ministério da Economia, Lisboa.
- IGM. (2001). *Água Subterrânea: Conhecer para Preservar o Futuro*. Instituto Geológico e Mineiro, Ministério da Economia, Lisboa.
- INAG. (2001). *Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Douro*. Relatório Final.
- INETI. (2006). *Caracterização preliminar hidrogeológica e avaliação da qualidade das águas na área envolvente ao posto de gasolina da REPSOL da Torre*. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, Lisboa. (Relatório inédito).
- ITGE. (1991). *Guia Metodológica para la Elaboración de Perímetros de Protección de Capataciones de Aguas Subterráneas*. Instituto Tecnológico GeoMineiro de España.
- Ivanov, V.V. (1979). *Genetic Classification of Mineralized Waters*. Conference of Cieplice Spa (Poland), 1978: 99-115. Polish Geological Institute, Warsaw.
- Krijgsman, B., Lobo-Ferreira, J. P. (2001). *A methodology for delineating wellhead protection areas*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.
- LAIST. (2018). *Relatório de Análise Físico-Química Completa – Fundação Inatel, Furo dos Barbeitos, situado em Quinta da Torre, Entre-os-Rios*. Laboratório de Análises do Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- Laureano, Z. (2012). *Metodologia para delimitar perímetros de protecção de captações de água subterrânea: aplicação ao aquífero Mio-Pliocénico do Tejo*. (Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa).

- Le Grand, H. E. (1983). *A standardized system for evaluating waste disposal sites*. NWWA, Worthington, Ohio.
- Leitão, T. (1997). *Metodologias de Reabilitação de Aquíferos Poluídos*. (Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, publicada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil).
- Lencastre, A.; Franco, F. M. (1992). *Lições de Hidrologia*, 2ª ed. Universidade Nova de Lisboa.
- LNEC. (2008). *Análise e parecer sobre a situação originada pelo derrame de hidrocarbonetos em Entre-os-Rios*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. (Relatório inédito).
- LNEG. (2011). *Hidrogeologia - Água subterrânea: conhecer para preservar*. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Lisboa.
- Lobo-Ferreira, J. P. (1988). *A Comparative Analysis of Mathematical Mass Transport Models and Tracer Experiments for Groundwater Pollution Studies*. (Doctoral Thesis, Technische Universität Berlin).
- Lobo-Ferreira, J. P. e Oliveira, M.M. (1997) DRASTIC groundwater vulnerability mapping of Portugal, groundwater: An endangered resource. In Proceedings of the 27th congress of the international association for hydraulic research, August 10–15, Theme C, pp. 132–137, São Francisco, EUA.
- Lobo-Ferreira, J. P., Cabral, M. (1991). *Proposal for an Operational Definition of Vulnerability for the European Community's Atlas of Groundwater Resources*. Meeting of the European Institute for Water, Groundwater Work Group Brussels.
- Lobo-Ferreira, J. P., Leitão, T. E., Oliveira, M. M., Rocha J. S., Barbosa, A. E. (2009). *Protecção das Origens Superficiais e Subterrâneas nos Sistemas de Abastecimento de Água*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Instituto Regulador de Águas e Resíduos, Lisboa.
- Lobo-Ferreira, J. P., Oliveira, M. M. (1993). Desenvolvimento de um inventário das águas subterrâneas de Portugal – Caracterização dos recursos hídricos subterrâneos e mapeamento DRASTIC da vulnerabilidade dos aquíferos de Portugal. Lisboa, LNEC, Relatório 179/93 – GIAS.
- Lobo-Ferreira, J. P., Oliveira, M.M. (2004). *Groundwater vulnerability assessment in Portugal; Geofísica Internacional*. Vol. 43, Num. 4, pp. 541-550.
- Lombardi Neto, F. et al, (1991). *Terraceamento Agrícola*. Boletim Técnico 206, Secretaria de Agricultura e Abastecimento, CATI, Capinas.
- Lopez Vergara, J. L. (1988). *Manual de fotogeología*. 3ª ed. Junta de Energía Nuclear, Madrid.
- Lourenço, C. (2019). *Águas Minerais Naturais do Conhecimento à gestão, Exploração e Valorização*. Congresso Internacional De Termalismo, Direcção de Recursos Hidrogeológicos e Geotérmicos da Direcção Geral de Energia e Geologia, Chaves.
- Lourenço, C., Pascoal, R. (2019). *O Estudo Metagenómico das Águas Minerais Naturais tendo em vista o Reconhecimento Científico das Vocações Terapêuticas*. Direcção de Recursos Hidrogeológicos e Geotérmicos da Direcção Geral de Energia e Geologia.
- Marsily, G. (1986). *Quantitative Hydrogeology*. Groundwater Hydrology for Engineers, Academic Press, USA.
- Matias, J. M. G. (2010). *Vulnerabilidade Natural e Risco de contaminação do subsistema aquífero da Mata do Urso*. (Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra).
- Matos Fernandes, M. (2006). *Mecânica dos Solos: Conceitos e Princípios Fundamentais*. Volume I, Edições FEUP, Porto.
- Matos, J. (2008). *Fundamentos de Informação Geográfica*. Lidel, 5ª Edição actualizada e aumentada, Lisboa.
- Maurer, B. A., (1998). *Geographical Population Analysis: Tools for the Analysis of Biodiversity*. Oxford: Blackwell.

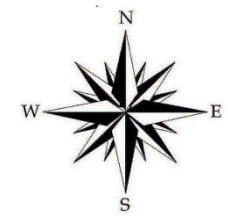
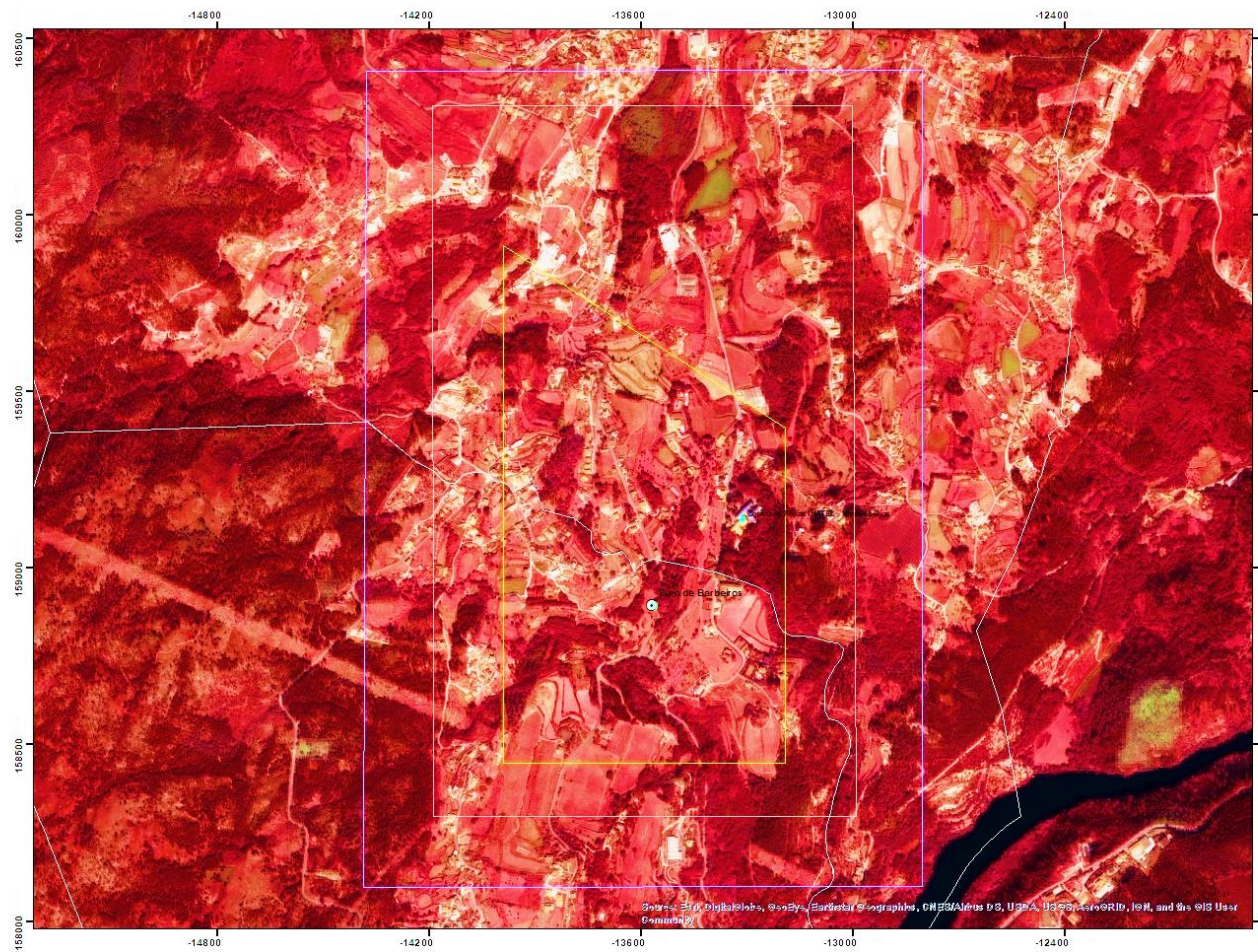
- Medeiros, A. C., Pereira, E., Moreira, A. (1980). *Carta Geológica de Portugal, na escala 1/50000. Notícia Explicativa da Folha 9-D (Penafiel)*. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- Medeiros, A. C., Pilar, L., Fernandes, A.P. (1964). *Carta Geológica de Portugal, na escala 1/50000. Notícia Explicativa da Folha 13-B (Castelo de Paiva)*. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- Meinzer, O. E. (1923). *Outline of Groundwater Hydrology with definitions*. USGS Water-Supply paper 494.
- Mejuto, M. F., Castaño, S., Vela A. (1999). *Utilidad de las Técnicas de Observación de la Tierra a lá Elaboración de Mapas de Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación de Aguas Subterráneas*. VIII Congreso Nacional de Teledetección, Albacete, Espanha.
- Mendes, B., Oliveira, J. F. S. (2004). *Qualidade da água para consumo humano*. Lidel, Edições Técnicas Lda, Lisboa.
- Moinante, M. J. A. (2003). *Delimitação de Perímetros de Protecção de Captações de Águas Subterrâneas – Estudo comparativo utilizando métodos analíticos e numéricos*. (Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, publicada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil).
- Mook, W.G. (2000). *Environmental isotopes in the hydrological cycle: Principles and applications*. Volume I.
- Oliveira, et al., (2002). *Proposta de uma Metodologia para a Definição Áreas de Infiltração Máxima*. 6º Congresso Nacional da Água, Agência Portuguesa do dos Recursos Hídricos.
- Oliveira, M. M., Moinante, M. J., Lobo-Ferreira, J. P. (1997). *Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com Base na Aplicação do Método DRASTIC*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 60/97 – GIAS.
- Paralta, E. A., Oliveira, M. M., Batista, S. B., Francés, A. P., Ribeiro, L. F., Cerejeira, M. J. (2001). *A aplicação de SIG na Avaliação da Vulnerabilidade aquífera e cartografia da contaminação agrícola por pesticidas e nitratos na região do Ribatejo*. Seminário sobre a Hidroinformática em Portugal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Ribeiro, L. (2001). *Vulnerabilidade de aquíferos e medidas de protecção das águas subterrâneas em Portugal Continental*. Seminário de Geotecnia Ambiental, Porto.
- Ribeiro, O., Lautensach, H., Daveau, S. (1987). *Geografia de Portugal*. Vol. I, A posição geográfica e o território, Edições João Sá da Costa, Lisboa.
- Rodrigues, R. R. (1986). *Avaliação das disponibilidades hídricas superficiais com base na precipitação*. Introdução ao Planeamento e Gestão de Recursos Hídricos, vol. 4, Série Metodologias para a Avaliação de Políticas de Recursos Hídricos, NATO-POWATERS Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Romeiro, C. (2012). *A tecnologia SIG aplicada ao estudo da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas na bacia hidrográfica das ribeiras do oeste*. (Tese de Mestrado, Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação, Universidade Nova de Lisboa).
- Sanders, L.L. (1998). *A manual of field hydrogeology*. Prentice Hall.
- Schoeller H. (1982). *Sur les eaux thermominérales et leur origine*. In: Romariz, C., 3ª Semana de Hidrogeologia, Universidade de Lisboa.
- Schoeller, H. (1962). *Les eaux souterraines*. Masson & cie, Paris.
- Sinan, M., Razack, M. (2008). *An extension to the DRASTIC model to assess groundwater vulnerability to pollution: application to the haouz aquifer of Marrakech (Marocco)*. Environmental Geology, Volume 57, Issue 2, pp. 349-363.
- Singhal, B. B. S., Gupta, R. P. (2010). *Applied hydrogeology of fractured rocks*. Second Editions, Springer, Dordrecht.
- Teixeira, F. (2017). *Águas Minerais Naturais e de Nascente da Região Norte - O Termalismo na Região Norte*. FEDRAVE, Aveiro, pp. 157-193.
- Teixeira, J. (2011). *Hidrogeomorfologia e sustentabilidade de recursos hídricos subterrâneos*. (Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro).

- Todd, D. K. (1980). *Groundwater hydrology*. John Wiley & Sons, New York.
- Tolman, C. F. (1937). *Groundwater*. McGraw Hill Book Company, Inc., New York.
- USGS. (2020). The Fundamentals of the Water Cycle. United States Geological Survey. [https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/fundamentals-water-cycle?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/fundamentals-water-cycle?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)
- Van Stempvoort, D., Ewert, L., Wassenaar, L. (1992). *AVI: A Method for Groundwater Protection Mapping in the Prairie Provinces of Canada*. Groundwater and Contaminants Project, Environmental Sciences Division, National Hydrology Research Institute.
- Xavier, J. M., Gagliardi, S., Vidal, H., Montano, M., Lucena, L. R. F. (2004). *Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Mercedes en el área metropolitana de la Ciudad de Paysandú – Comparación de los Métodos GOD y DRASTIC*. Revista Latino-Americana de Hidrogeología, n.º 4, pp. 35-45.
- Zoby, J. L. G., Oliveira, F. R. (2005). *Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil*. ANA - Agência Nacional de Águas.

## WEBGRAFIA

- APA – Publicações da Agência portuguesa do Ambiente:  
<https://apambiente.pt/index.php?ref=19> (acedido em 12/12/2019).
- APRH – publicações da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos:  
<https://aprh.pt/pt/> (acedido em 05/01/2020)
- CIGeoE – Base de dados do Centro de Informação Geoespacial do Exército:  
<https://cnt.dgterritorio.pt/node/5570>, <http://www.igeoe.pt/cigeoesig/> (acedido em 10/02/2020)
- DGEG - Publicações do Projecto – Hidrogenoma da Direcção Geral de Energia e Geologia:  
<https://hidrogenoma.javali.pt/> (acedido em 07/01/2020)
- EPA – Publicações da Agência de Protecção Ambiental dos Estados Unidos:  
<https://www.epa.gov/environmental-topics/water-topics> (acedido em 15/12/2019)
- ESA – Base de dados e publicações da Agência Espacial Europeia:  
<http://www.esa.int/>; <https://www.sentinel-hub.com/> (acedido em 29/05/2020).
- ESRI – Base de dados e manuais da *Environmental Systems Research Institute*:  
<https://livingatlas2.arcgis.com/landsatexplorer/> (acedido em 07/03/2020).
- GeoPortal do LNEG - A Cartografia ao Serviço do Conhecimento do Território:  
<http://geoportal.lneg.pt/>, <http://www.igeoe.pt/cigeoesig/> (acedido em 14/02/2020).
- LNEC – publicações do Laboratório Nacional de engenharia Civil:  
<http://www.lnec.pt/pt/investigacao/publicacoes/> (acedido em 2/11/2019).
- SNIG – Base de Dados do Sistema Nacional de Informação geográfica:  
<https://snig.dgterritorio.gov.pt/> (acedido em 28/01/2020).
- SNIRH – Base de dados e publicações do Sistema Nacional de Informação Geográfica dos Recursos Hídricos:  
<https://snirh.apambiente.pt/> (acedido em 02/03/2020).
- USGS – Base de dados e publicações do Serviço Geológico dos Estados Unidos:  
<https://www.usgs.gov/> (acedido em 20/03/2020), <https://earthexplorer.usgs.gov/> (acedido em 02/05/2020), <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> (acedido em 21/04/2020).

# APÊNDICES



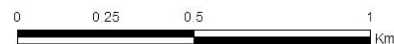
Detecção Remota da área envolvente ao Furo de Barbeitos

Foto-Interpretação das imagens de Satélite – Sentibel -2

Combinação RGB  
*Color Infrared - Vegetation*

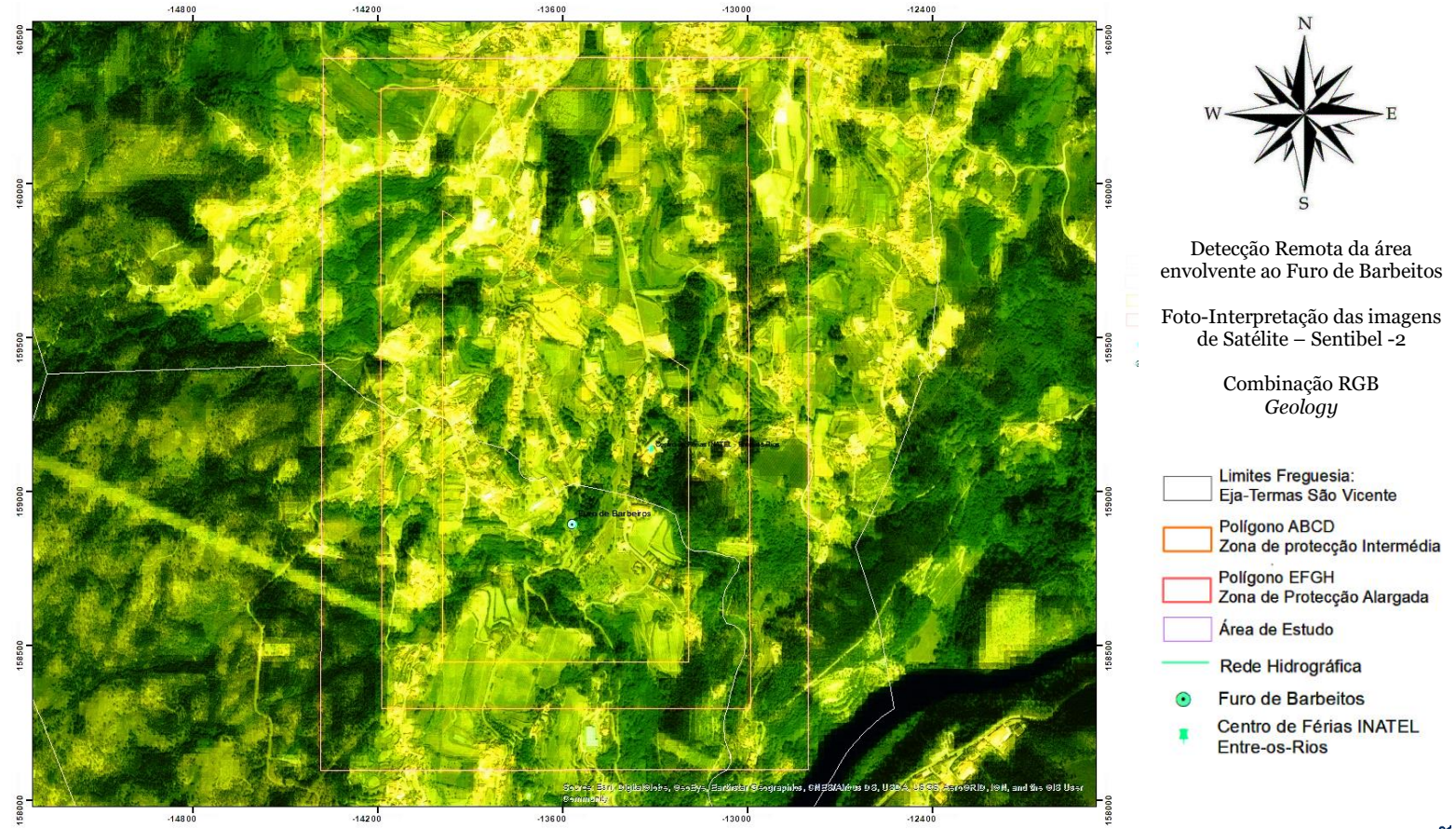
- Limites Freguesia: Eja-Termas São Vicente
- Polígono ABCD  
Zona de protecção Intermédia
- Polígono EFGH  
Zona de Protecção Alargada
- Área de Estudo
- Rede Hidrográfica
- Furo de Barbeitos
- Centro de Férias INATEL Entre-os-Rios

Coordinate System: ETRS 1989 PortugalTM06  
Projection: Transverse Mercator  
Datum: ETRS 1989  
Central Meridian: -8 1331  
Units: Meter

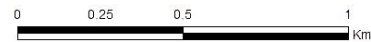


Author: Vanessa Alexandra Santos Alvané Gonçalves. M9557



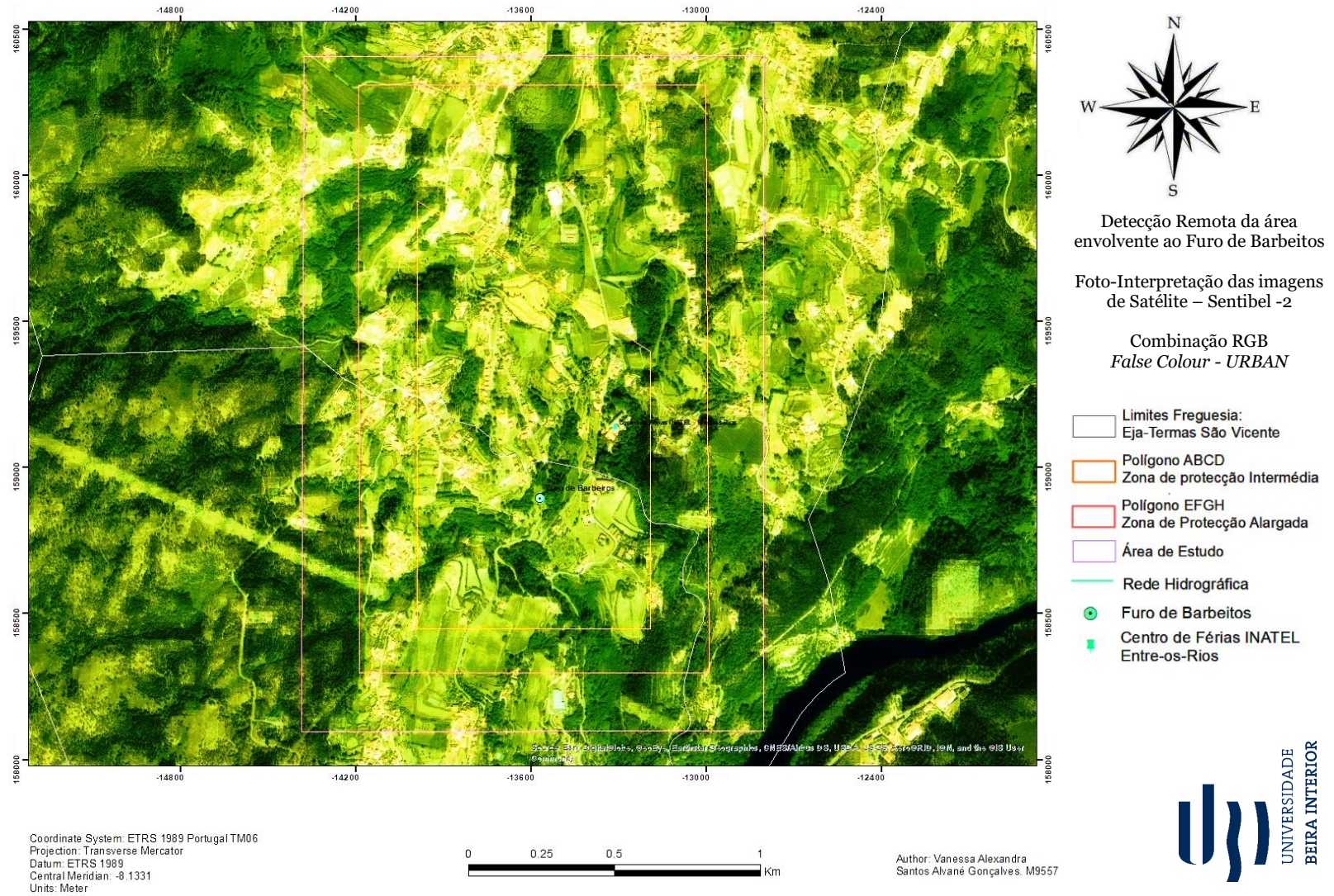


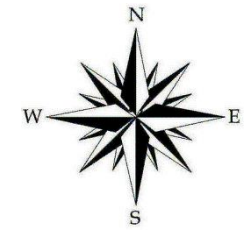
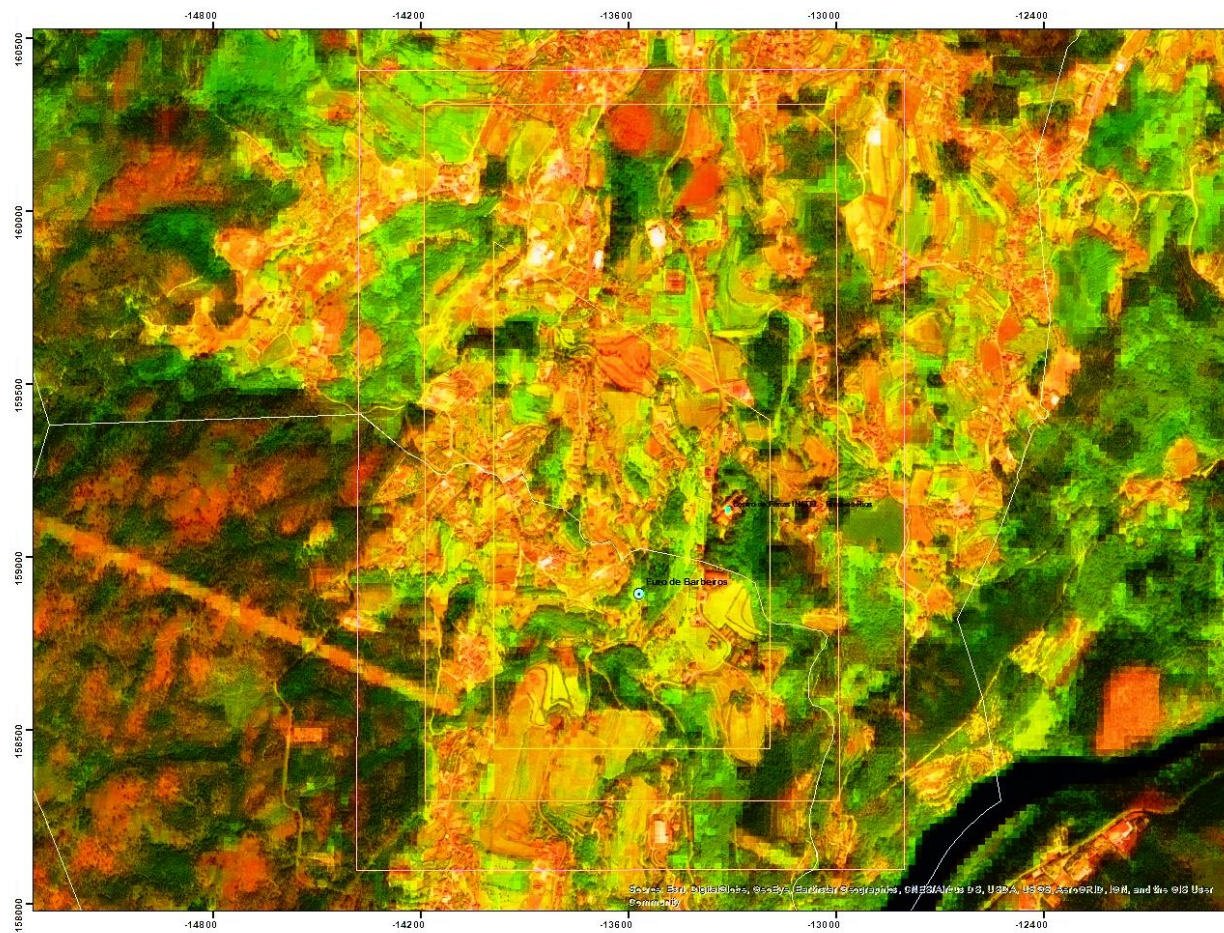
Coordinate System: ETRS 1989 Portugal TM06  
 Projection: Transverse Mercator  
 Datum: ETRS 1989  
 Central Meridian: -8.1331  
 Units: Meter



Author: Vanessa Alexandra Santos Alvané Gonçalves. M9557







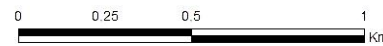
Deteção Remota da área envolvente ao Furo de Barbeitos

Foto-Interpretação das imagens de Satélite – Sentinel-2

Combinação RGB  
*Agriculture*

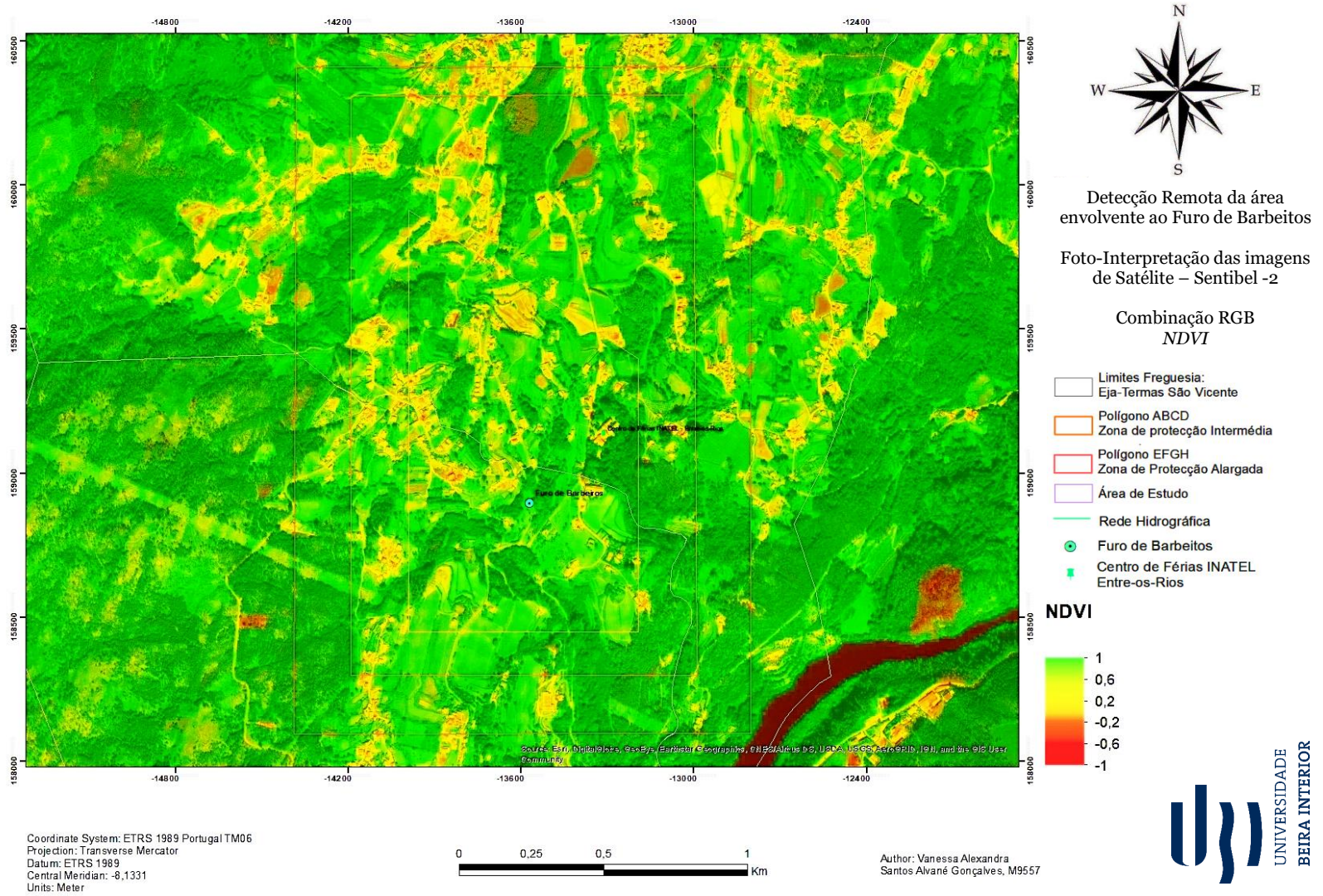
-  Limites Freguesia:  
Eja-Termas São Vicente
-  Polígono ABCD  
Zona de protecção Intermédia
-  Polígono EFGH  
Zona de Protecção Alargada
-  Área de Estudo
-  Rede Hidrográfica
-  Furo de Barbeitos
-  Centro de Férias INATEL  
Entre-os-Rios

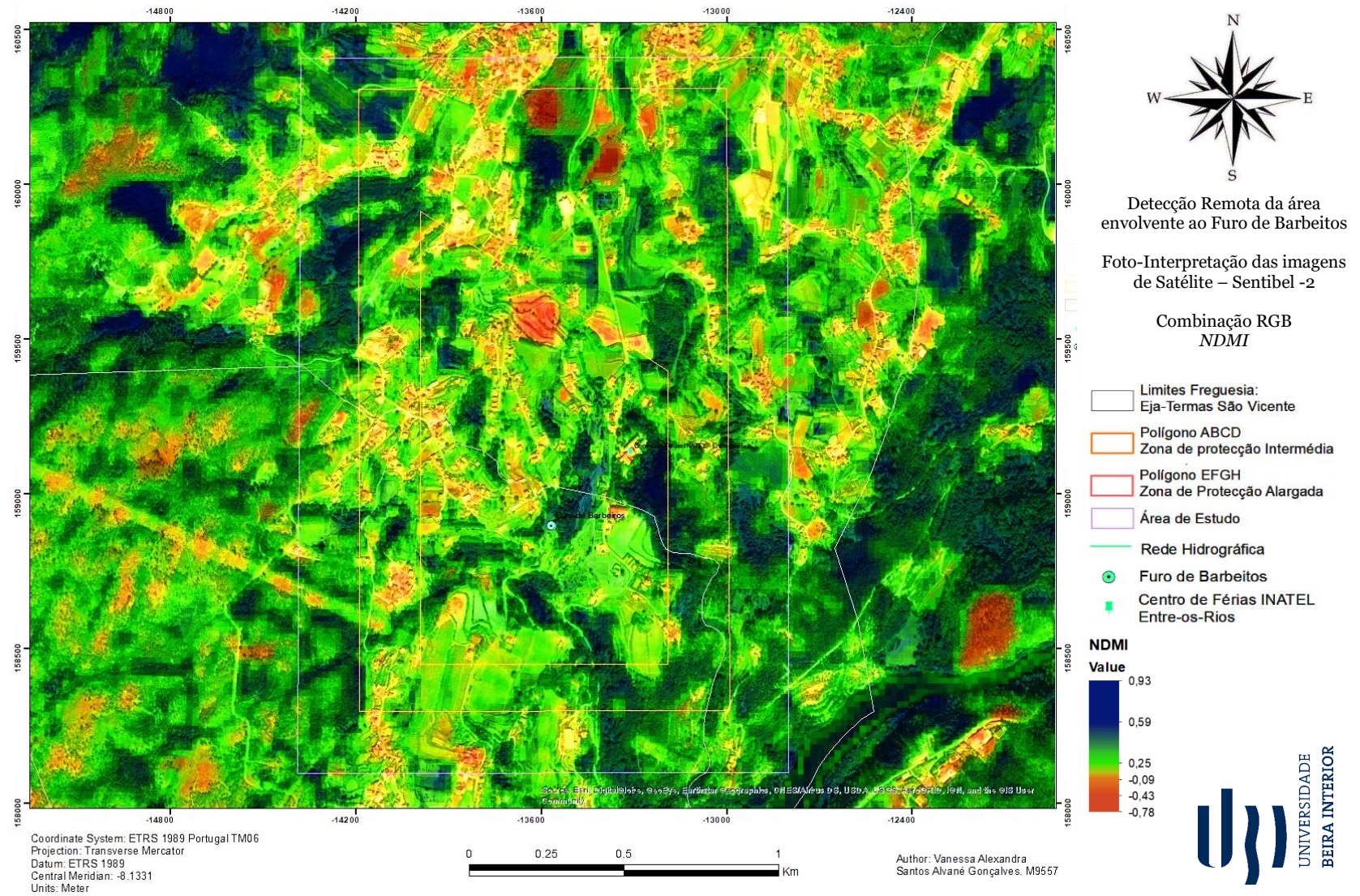
Coordinate System: ETRS 1989 Portugal TM06  
Projection: Transverse Mercator  
Datum: ETRS 1989  
Central Meridian: -8.1331  
Units: Meter

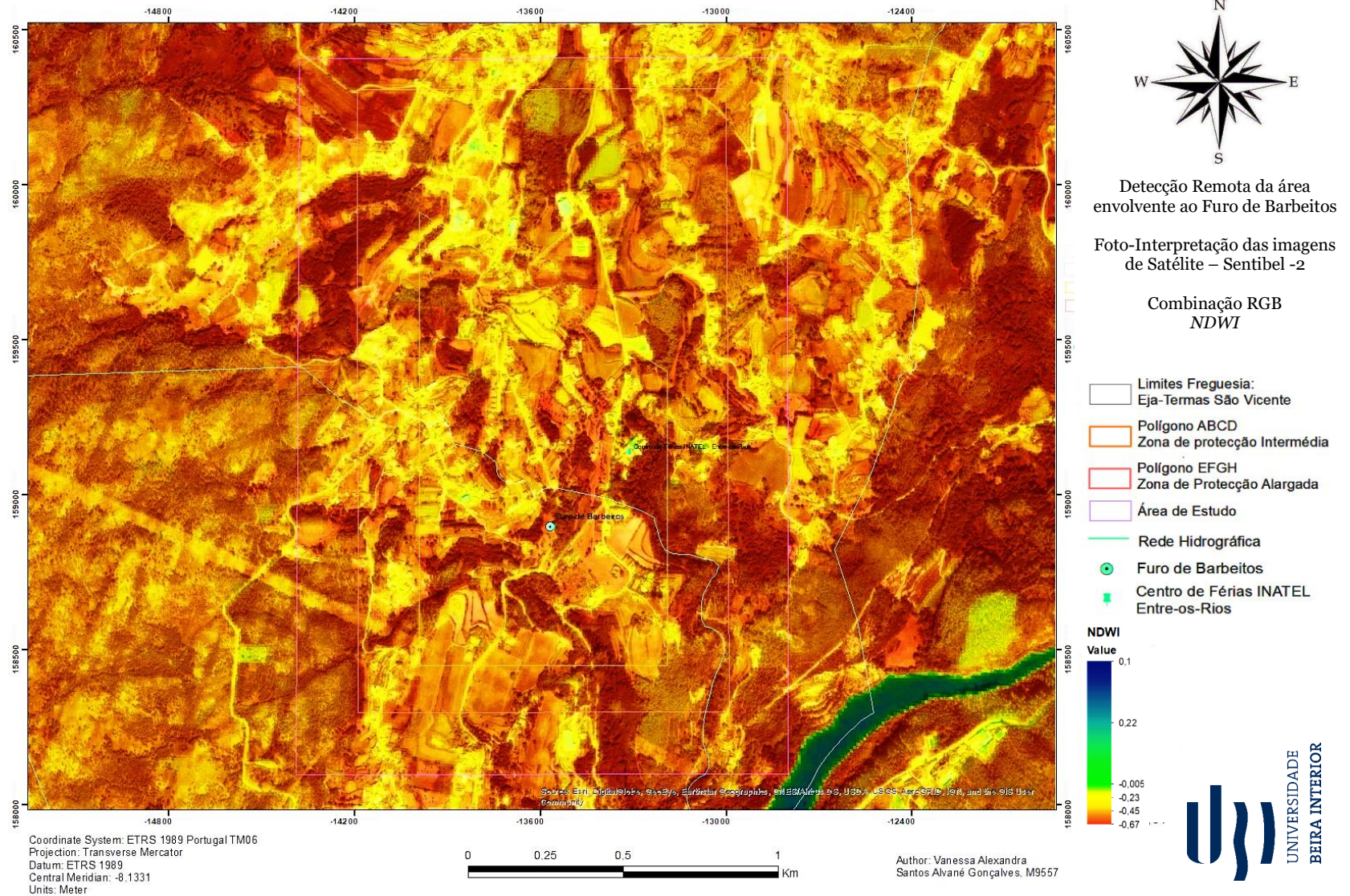


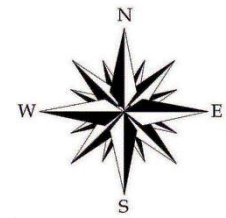
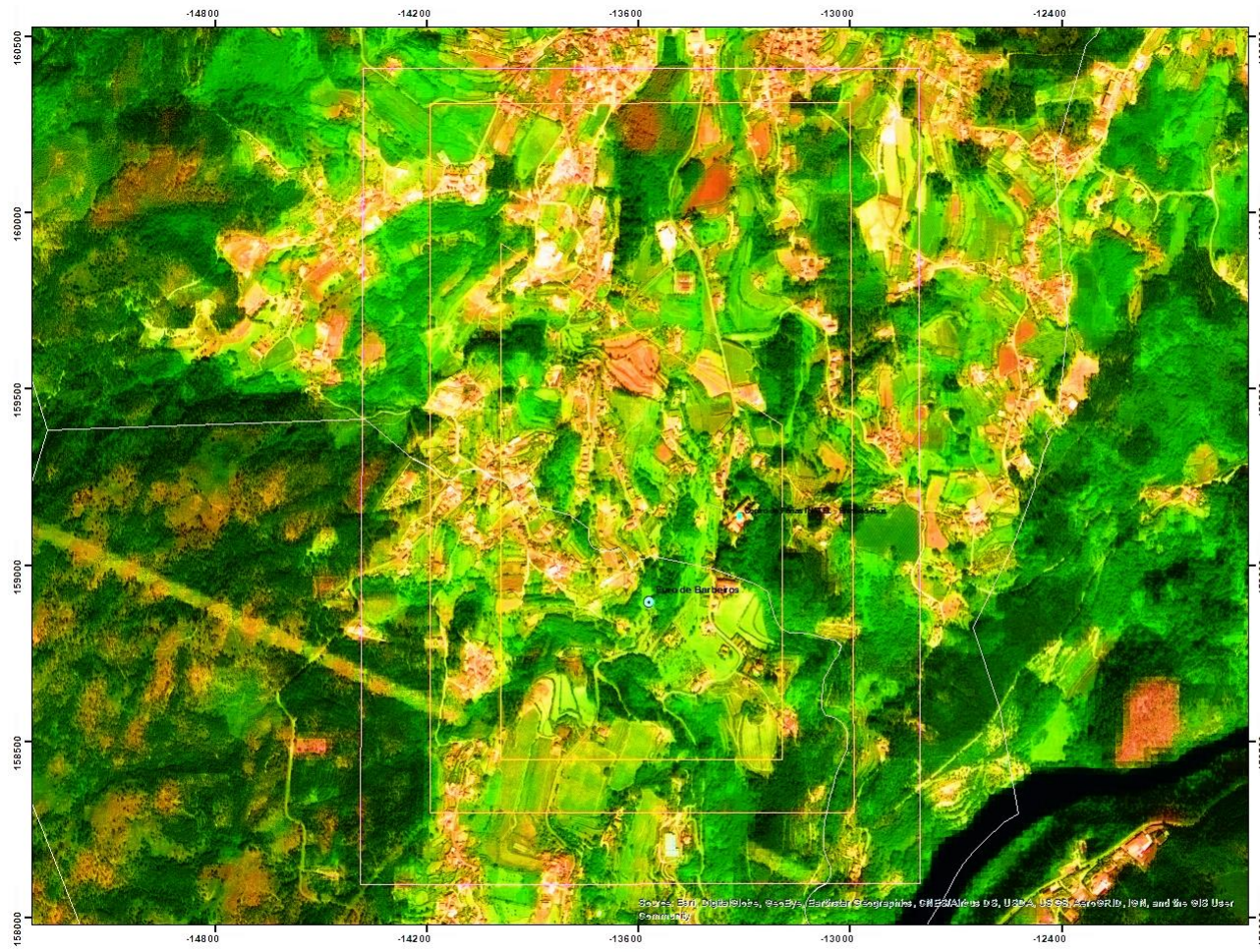
Author: Vanessa Alexandra  
Santos Alvanê Gonçalves. M9557











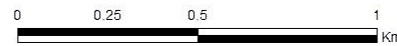
Deteção Remota da área envolvente ao Furo de Barbeitos

Foto-Interpretação das imagens de Satélite – Sentibel -2

Combinação RGB  
SWIR-1

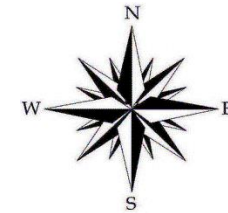
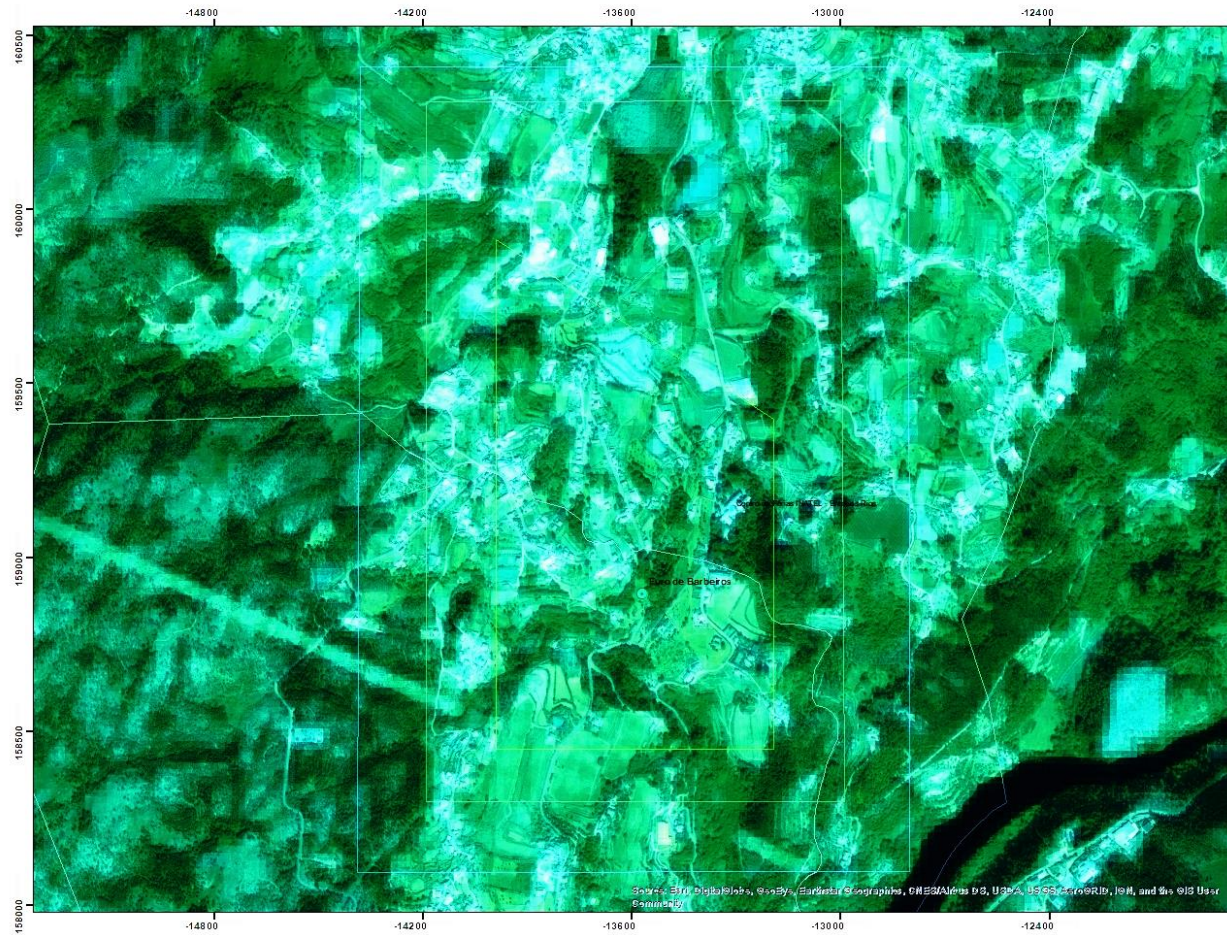
- Limites Freguesia: Eja-Termas São Vicente
- Polígono ABCD  
Zona de protecção Intermédia
- Polígono EFGH  
Zona de Protecção Alargada
- Área de Estudo
- Rede Hidrográfica
- Furo de Barbeitos
- Centro de Férias INATEL Entre-os-Rios

Coordinate System: ETRS 1989 Portugal TM06  
Projection: Transverse Mercator  
Datum: ETRS 1989  
Central Meridian: -8.1331  
Units: Meter



Author: Vanessa Alexandra Santos Alvané Gonçalves. M9557





Deteccção Remota da área envolvente ao Furo de Barbeitos

Foto-Interpretação das imagens de Satélite – Sentibel -2

Combinação RGB  
SWIR-2

-  Limites Freguesia: Eja-Termas São Vicente
-  Polígono ABCD  
Zona de protecção Intermédia
-  Polígono EFGH  
Zona de Protecção Alargada
-  Área de Estudo
-  Rede Hidrográfica
-  Furo de Barbeitos
-  Centro de Férias INATEL Entre-os-Rios

Coordinate System: ETRS 1989 Portugal TM06  
Projection: Transverse Mercator  
Datum: ETRS 1989  
Central Meridian: -8.1331  
Units: Meter



Author: Vanessa Alexandra  
Santos Alvané Gonçalves. M9557



# ANEXOS

## ANEXO I

## MINISTÉRIO DO AMBIENTE

Decreto-Lei n.º 382/99

de 22 de Setembro

As águas subterrâneas constituem importantes origens de água, efectivas ou potenciais, a nível regional e local, que importa conservar. Porém, a qualidade das águas subterrâneas é susceptível de ser afectada pelas actividades sócio-económicas, designadamente pelos usos e ocupações do solo, em particular pelas áreas urbanas, infraestruturas e equipamentos, agricultura e zonas verdes. A contaminação das águas subterrâneas é, na generalidade das situações, persistente, pelo que a recuperação da qualidade destas águas é, em regra, muito lenta e difícil. A protecção das águas subterrâneas constitui, assim, um objectivo estratégico da maior importância, no quadro de um desenvolvimento equilibrado e duradouro.

Um instrumento preventivo para assegurar a protecção das águas subterrâneas é a instituição de perímetros de protecção das captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público. Trata-se de áreas definidas na vizinhança dessas captações em que se estabelecem restrições de utilidade pública ao uso e transformação do solo, em função das características pertinentes às formações geológicas, que armazenam as águas subterrâneas exploradas pelas captações e dos caudais extraídos, como forma de salvaguardar a protecção da qualidade dessas águas subterrâneas.

Os perímetros de protecção das captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público visam, assim:

Prevenir, reduzir e controlar a poluição das águas subterrâneas por infiltração de águas pluviais lixivantes e de águas excedentes de rega e de lavagens;

Potenciar os processos naturais de diluição e de autodepuração das águas subterrâneas;

Prevenir, reduzir e controlar as descargas acidentais de poluentes;

Proporcionar a criação de sistemas de aviso e alerta para a protecção dos sistemas de abastecimento de água com origem nas captações de águas subterrâneas, em situações de poluição accidental dessas águas.

A delimitação dos perímetros de protecção é realizada recorrendo a métodos hidrogeológicos apropriados que têm em conta os caudais de exploração, as condições da captação e as características do sistema aquífero explorado. A fixação dos caudais de exploração e o dimensionamento das captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público têm que atender, necessariamente, aos aspectos económicos, já que a delimitação dos perímetros de protecção das captações impõe restrições ao uso do solo em áreas significativas que se traduzem em custos económicos que se repercutem sobre o custo da água na origem. De facto, não se afigura razoável delimitar perímetros de protecção com áreas ou com restrições excessivas se tal não se traduzir num benefício efectivo em termos da protecção das águas subterrâneas, pelo que se tem de exigir que a delimitação dos perímetros de protecção seja baseada em estudos hidrogeológicos suficientemente rigorosos para evidenciar a eficácia das medidas de protecção impostas. Por outro lado, não fará sentido localizar captações em áreas em que as pressões sobre o uso do solo são de tal maneira elevadas que os custos de oportunidade das restrições impostas se traduzam em custos da água na origem que não sejam razoáveis, quando comparadas com

outras alternativas, sem prejuízo dos critérios gerais que devem ser atendidos na protecção das águas subterrâneas. Sempre que não possam ser realizados esses estudos — por exemplo, no caso de captações com menor capacidade ou em que o uso do solo é compatível com a protecção das águas subterrâneas —, definem-se critérios simples, mas suficientemente rigorosos, que asseguram a efectiva protecção das águas subterrâneas como origens de água para consumo humano.

Os instrumentos normativos vigentes não permitem salvaguardar adequadamente a qualidade das águas subterrâneas, pelo que se justifica a instituição, através do presente decreto-lei, dos perímetros de protecção das captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público.

Foi ouvida a Associação Nacional de Municípios Portugueses, bem como os órgãos de Governo próprio das Regiões Autónomas.

Assim:

Nos termos da alínea a) do n.º 1 do artigo 198.º da Constituição, o Governo decreta, para valer como lei geral da República, o seguinte:

Artigo 1.º

### OBJECTIVO E ÂMBITO

O presente diploma estabelece as normas e os critérios para a delimitação de perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público, adiante designados por perímetros de protecção, com a finalidade de proteger a qualidade das águas dessas captações.

As captações de água subterrânea destinadas ao abastecimento público de água para consumo humano de aglomerados populacionais com mais de 500 habitantes ou cujo caudal de exploração seja superior a 100 m<sup>3</sup>/dia ficam abrangidas pelo disposto no presente diploma para todas as zonas de protecção previstas e definidas nos termos do presente decreto-lei.

Todas as captações de água subterrânea destinadas ao abastecimento público de água para consumo humano são abrangidas pelo disposto no presente diploma no que diz respeito à delimitação da zona de protecção imediata.

Artigo 2.º

### DEFINIÇÕES

Para efeitos do presente diploma entende-se por:

- a) «Aquífero» — domínio espacial de uma formação geológica, limitado em superfície e em profundidade, que pode armazenar água em condições de ser explorada economicamente;
- b) «Captação de água subterrânea destinada ao abastecimento público» — origem de água subterrânea destinada ao consumo humano mediante um sistema de abastecimento público;
- c) «Caudal de exploração» — volume de água extraída de um aquífero por unidade de tempo;
- d) «Espessura saturada na captação» — fracção da captação que se encontra preenchida por água;
- e) «Intrusão marinha» — processo que se pode verificar nos aquíferos costeiros, e que consiste no avanço sobre o continente de massas de água salgada;
- f) «Poluição» — degradação da qualidade natural da água, em resultado de actividades humanas, tornando-a imprópria como origem de água destinada à produção de água para consumo humano, nos termos dos artigos 13.º a 19.º do Decreto Lei n.º 236/98 de 1 de Agosto;
- g) «Porosidade eficaz» — percentagem do volume total de uma formação geológica que é ocupada por poros interligados, através dos quais se pode estabelecer um fluxo de água;
- h) «Qualidade da água» — conjunto de valores de parâmetros físicos, químicos, biológicos e microbiológicos da água que permite avaliar a sua

adequação como origem de água para a produção de água para consumo humano, nos termos dos artigos 13.º a 19.º do Decreto Lei n.º 236/98 de 1 de Agosto.

- i) «Sistema aquífero» — domínio espacial de uma ou várias formações geológicas, limitado em superfície e em profundidade, que define um ou vários aquíferos, relacionados ou não entre si, e que constitui uma unidade prática para a exploração de águas subterrâneas.

#### Artigo 3.º

##### PERÍMETRO DE PROTECÇÃO

1 — O perímetro de protecção é a área contígua à captação na qual se interdita ou condicionam as instalações e as actividades susceptíveis de poluírem as águas subterrâneas, que engloba as seguintes zonas:

- a) Zona de protecção imediata — área da superfície do terreno contígua à captação em que, para a protecção directa das instalações da captação e das águas captadas, todas as actividades são, por princípio, interditas;
- b) Zona de protecção intermédia — área da superfície do terreno contígua exterior à zona de protecção imediata, de extensão variável, tendo em conta as condições geológicas e estruturais do sistema aquífero, definida por forma a eliminar ou reduzir a poluição das águas subterrâneas, onde são interditas ou condicionadas as actividades e as instalações susceptíveis de poluírem aquelas águas, quer por infiltração de poluentes, quer por poderem modificar o fluxo na captação ou favorecer a infiltração na zona próxima da captação;
- c) Zona de protecção alargada — área da superfície do terreno contígua exterior à zona de protecção intermédia, destinada a proteger as águas subterrâneas de poluentes persistentes, tais como compostos orgânicos, substâncias radioactivas, metais pesados, hidrocarbonetos e nitratos, onde as actividades e instalações são interditas ou condicionadas em função do risco de poluição das águas, tendo em atenção a natureza dos terrenos atravessados, a natureza e a quantidade de poluentes, bem como o modo de emissão desses poluentes.

2 — A delimitação dos perímetros de protecção, englobando as diferentes zonas definidas no número anterior, obedece a critérios geológicos, hidrogeológicos e económicos estabelecidos em função das características do aquífero em que se encontra a captação, as condições da captação e os caudais de exploração, mediante a realização de estudos hidrogeológicos e económicos.

3 — Quando não existam e não seja possível realizar os estudos hidrogeológicos mencionados no número anterior, mediante prévio parecer favorável da direcção regional do ambiente territorialmente competente, a determinação das zonas de protecção poderá ser feita através de recurso ao método do raio fixo, calculado de acordo com o anexo ao presente diploma, que dele faz parte integrante, ou outro método considerado mais adequado.

4 — Os estudos hidrogeológicos e a aplicação do método do raio fixo têm de ser realizados por técnicos com as habilitações académicas adequadas para o efeito.

5 — O perímetro de protecção poderá não incluir as zonas de protecção intermédia ou a zona de protecção alargada relativamente a captações de águas subterrâneas em sistemas aquíferos cujo risco de poluição seja reduzido, demonstrado por estudos hidrogeológicos.

6 — Sempre que se justifique, nomeadamente em zonas em que haja conexão hidráulica directa ou através de condutas cársicas ou fissuras, o perímetro de protecção poderá ainda englobar zonas de protecção especial,

mediante a realização de estudos hidrogeológicos específicos.

#### Artigo 4.º

##### DELIMITAÇÃO DOS PERÍMETROS DE PROTECÇÃO

1 — Compete ao Governo, através de resolução do Conselho de Ministros, aprovar a delimitação dos perímetros de protecção, identificando as instalações e actividades, de entre as mencionadas nos n.ºs 2, 4 e 7 do artigo 6.º, que ficam sujeitas a interdições ou a condicionamentos e definindo o tipo de condicionamentos.

2 — As propostas de delimitação e respectivos condicionamentos são elaboradas pela direcção regional do ambiente territorialmente competente com base nas propostas e estudos próprios que lhe sejam apresentados pela entidade requerente da licença de captação de águas subterrâneas destinadas ao consumo humano, de acordo com o disposto no presente diploma, no disposto no Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto, e demais legislação aplicável.

3 — As entidades responsáveis pelas captações já existentes, quer estejam em funcionamento quer constituam uma reserva potencial de abastecimento de água subterrânea, devem promover a delimitação dos perímetros de protecção nos termos previstos nos números anteriores.

4 — Os perímetros de protecção das captações de água subterrânea para abastecimento público de água para consumo humano são revistos, sempre que se justifique, por iniciativa da direcção regional do ambiente territorialmente competente ou da entidade responsável pela captação.

5 — A autorização para a captação destinada ao consumo humano, prevista no Decreto-Lei n.º 46/94, de 22 de Fevereiro, que se insira no âmbito de aplicação do presente diploma pressupõe a prévia delimitação do respectivo perímetro de protecção.

#### Artigo 5.º

##### PROTECÇÃO SANITÁRIA DA CAPTAÇÃO

1 — A «cabeça» das captações verticais de águas subterrâneas — poços ou furos — deve estar a cota superior ao terreno circundante, mantendo-se a mesma fechada, de tal forma que se evite a entrada de substâncias de qualquer tipo, devendo ainda o revestimento da captação ser exteriormente rodeado de uma superfície impermeabilizante que promova a drenagem para áreas mais afastadas da captação, de águas que escorram superficialmente para áreas mais afastadas da captação. 2 — Todas as restantes captações de águas subterrâneas têm que estar devidamente protegidas contra a introdução de substâncias poluentes e actos de vandalismo, através de uma porta ventilada.

#### Artigo 6.º

##### SERVIDÕES ADMINISTRATIVAS E RESTRIÇÕES DE UTILIDADE PÚBLICA

1 — Na zona de protecção imediata é interdita qualquer instalação ou actividade, com excepção das que têm por finalidade a conservação, manutenção e melhor exploração da captação. Nesta zona o terreno é vedado e tem que ser mantido limpo de quaisquer resíduos, produtos ou líquidos que possam provocar infiltração de substâncias indesejáveis para a qualidade da água de captação.

2 — Na zona de protecção intermédia podem ser interditas ou condicionadas as seguintes actividades e instalações quando se demonstrarem susceptíveis de provocarem a poluição das águas subterrâneas:

- a) Pastorícia;
- b) Usos agrícolas e pecuários;
- c) Aplicação de pesticidas móveis e persistentes na água ou que possam formar substâncias tóxicas,

- persistentes ou bioacumuláveis;
- d) Edificações;
  - e) Estradas e caminhos de ferro;
  - f) Parques de campismo;
  - g) Espaços destinados a práticas desportivas;
  - h) Estações de tratamento de águas residuais;
  - i) Colectores de águas residuais;
  - j) Fossas de esgoto;
  - l) Unidades industriais.
  - m) Cemitérios;
  - n) Pedreiras e quaisquer escavações;
  - o) Explorações mineiras;
  - p) Lagos e quaisquer obras ou escavações destinadas à recolha e armazenamento de água ou quaisquer substâncias susceptíveis de se infiltrarem;
  - q) Depósitos de sucata.

3 — Na zona de protecção intermédia são interditas as seguintes actividades e instalações:

- a) Infra-estruturas aeronáuticas;
- b) Oficinas e estações de serviço de automóveis;
- c) Depósitos de materiais radioactivos, de hidrocarbonetos e de resíduos perigosos;
- d) Postos de abastecimento e áreas de serviço de combustíveis;
- e) Transporte de hidrocarbonetos, de materiais radioactivos ou de outras substâncias perigosas;
- f) Canalizações de produtos tóxicos;
- g) Lixeiras e aterros sanitários.

4 — Na zona de protecção alargada podem ser interditas ou condicionadas as seguintes actividades e instalações quando se demonstrarem susceptíveis de provocarem a poluição das águas subterrâneas:

- a) Utilização de pesticidas móveis e persistentes na água ou que possam formar substâncias tóxicas, persistentes ou bioacumuláveis;
- b) Colectores de águas residuais;
- c) Fossas de esgoto;
- d) Lagos e quaisquer obras ou escavações destinadas à recolha e armazenamento de água ou quaisquer substâncias susceptíveis de se infiltrarem;
- e) Estações de tratamento de águas residuais;
- f) Cemitérios;
- g) Pedreiras e explorações mineiras;
- h) Infra-estruturas aeronáuticas;
- i) Oficinas e estações de serviço de automóveis;
- j) Postos de abastecimento e áreas de serviço de combustíveis;
- k) Depósitos de sucata.

5 — Na zona de protecção alargada são interditas as seguintes actividades e instalações:

- a) Transporte de hidrocarbonetos, de materiais radioactivos e de outras substâncias perigosas;
- b) Depósitos de materiais radioactivos, de hidrocarbonetos e de resíduos perigosos;
- c) Canalizações de produtos tóxicos;
- d) Refinarias e indústrias químicas;
- e) Lixeiras e aterros sanitários.

6 — Na zona de protecção especial, a que se refere o n.º 6 do artigo 3.º, são interditas quaisquer actividades ou instalações.

7 — Nas zonas de protecção contra o avanço da cunha salina, a que se refere o n.º 7 do artigo 3.º, podem ser limitados os caudais de exploração das captações existentes

e interdita a construção ou a exploração de novas captações de água subterrânea ou condicionado o seu regime de exploração.

Artigo 7.º

#### INDEMNIZAÇÕES

1 — As interdições e os condicionamentos decorrentes da aplicação do presente diploma podem dar lugar a indemnização nos termos previstos no artigo 8.º do Código das Expropriações.

2 — Aos proprietários dos terrenos que integrem as zonas de protecção imediata ou as zonas de protecção especial é assegurado o direito de requerer a respectiva expropriação, nos termos do Código das Expropriações.

3 — O disposto nos números anteriores não é aplicável sempre que os terrenos integrem o património de uma entidade pública.

Artigo 8.º

#### ENCARGOS

1 — Compete às entidades responsáveis pelas captações de águas subterrâneas abrangidas pelo disposto no presente diploma suportar as indemnizações decorrentes da aplicação do disposto no artigo anterior.

2 — Quando as indemnizações previstas no artigo 7.º se refiram a captações já existentes à data da entrada em vigor do presente diploma, as mesmas serão suportadas pela administração central, nomeadamente pelo Ministério do Ambiente, quando as captações se encontrem autorizadas, e pelas entidades mencionadas no número anterior, com possibilidade de comparticipação da administração central, quando as captações não se encontrem autorizadas.

Artigo 9.º

#### ENQUADRAMENTO NOS PLANOS DE BACIA HIDROGRÁFICA E PLANOS DE ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO

Os planos de bacia hidrográfica, bem como os planos municipais e os planos especiais de ordenamento do território, contemplam obrigatoriamente os perímetros de protecção delimitados nos termos do presente diploma.

Artigo 10.º

#### CONTRA-ORDENAÇÕES

1 — Constituem contra-ordenações:

- a) A não observância das interdições referidas nos n.ºs 1, 3, 5 e 6 do artigo 6.º;
- b) O não cumprimento das interdições ou dos condicionamentos que vierem a ser concretamente identificados na resolução do Conselho de Ministros prevista no n.º 1 do artigo 4.º.

2 — Sem prejuízo da aplicação das sanções acessórias previstas no regime geral das contra-ordenações, as contra-ordenações previstas no número anterior são puníveis com coima de 5000\$ a 750 000\$ ou, tratando-se de pessoa colectiva, de 50 000\$ a 9 000 000\$.

3 — A negligência é punível.

4 — São competentes para o processamento das contra-ordenações a direcção regional do ambiente e a câmara municipal da área onde se tenha praticado a infracção, cabendo ao director regional do ambiente ou ao presidente da câmara municipal a aplicação das respectivas coimas.

5 — A afectação do produto das coimas faz-se da seguinte forma:

- a) 60 % para o Estado;

- b) 40 % para a entidade que processou a contra-ordenação.

Artigo 11.º

EMBARGO E DEMOLIÇÃO

As obras e os trabalhos efectuados com inobservância das interdições ou dos condicionamentos previstos no presente diploma e daqueles que vierem a ser fixados na resolução do Conselho de Ministros referida no n.º 1 do artigo 4.º podem ser embargadas ou demolidas, sendo competentes para ordenar esse embargo ou demolição o director regional do ambiente ou o presidente da câmara municipal da área.

Artigo 12.º

REGIÕES AUTÓNOMAS

O presente diploma aplica-se às Regiões Autónomas dos Açores e da Madeira, sem prejuízo das competências cometidas aos respectivos órgãos de governo próprio e das adaptações que lhe venham a ser introduzidas por diploma regional.

Visto e aprovado em Conselho de Ministros em 22 de Julho de 1999. — Jaime José Matos da Gama — João Cardona Gomes Cravinho — Francisco Ventura Ramos — Elisa Maria da Costa Guimarães Ferreira.

Promulgado em 3 de Setembro de 1999.

Publique-se.

O Presidente da República, JORGE SAMPAIO.

Referendado em 9 de Setembro de 1999.

O Primeiro-Ministro, *António Manuel de Oliveira Guterres*.

ANEXO

Definição dos perímetros de protecção

No quadro seguinte admite-se que a captação é o único elemento drenante do aquífero, onde convergem todas as linhas de fluxo, e que não existem direcções privilegiadas de fluxo:

Tipo de sistema aquífero	Zona de protecção imediata	Zona de protecção intermédia	Zona de protecção alargada
Tipo 1	$r=20$ m	$r$ é o maior valor entre 40 m e $r_1$ ( $t=50$ dias)	$r$ é o maior valor entre 350 m e $r_1$ ( $t=3500$ dias)
Tipo 2	$r=40$ m	$r$ é o maior valor entre 60 m e $r_2$ ( $t=50$ dias)	$r$ é o maior valor entre 500 m e $r_2$ ( $t=3500$ dias)
Tipo 3	$r=30$ m	$r$ é o maior valor entre 50 m e $r_3$ ( $t=50$ dias)	$r$ é o maior valor entre 400 m e $r_3$ ( $t=3500$ dias)
Tipo de sistema aquífero	Zona de protecção imediata	Zona de protecção intermédia	Zona de protecção alargada
Tipo 4	$r=60$ m	$r$ é o maior valor entre 280 m e $r_4$ ( $t=50$ dias)	$r$ é o maior valor entre 2400 m e $r_4$ ( $t=3500$ dias)
Tipo 5	$r=60$ m	$r$ é o maior valor entre 140 m e $r_5$ ( $t=50$ dias)	$r$ é o maior valor entre 1200 m e $r_5$ ( $t=3500$ dias)
Tipo 6	$r=40$ m	$r$ é o maior valor entre 60 m e $r_6$ ( $t=50$ dias)	$r$ é o maior valor entre 500 m e $r_6$ ( $t=3500$ dias)

$$r_i(t) = \sqrt{\frac{Q \times t}{3,14 \times n \times H}}$$

em que:

$r_i(t)$  – raio do perímetro de protecção (metros).

$Q$  – caudal de exploração (metros cúbicos/dia);

$t$  – tempo necessário para um poluente atingir a captação (dia);

$n$  – porosidade eficaz (percentagem), expressa pelo quadro anexo.

$H$  – espessura saturada na captação (metros);

sendo os seguintes os tipos de sistemas aquíferos:

Tipo 1 – sistema aquífero confinado cujo suporte litológico é constituído por formações porosas;

Tipo 2 – sistema aquífero livre cujo suporte litológico é constituído por formações porosas;

Tipo 3 – sistema aquífero semiconfinado cujo suporte litológico é constituído por formações porosas;

Tipo 4 – sistema aquífero cujo suporte litológico é constituído por formações carbonatadas;

Tipo 5 – sistema aquífero cujo suporte litológico é constituído por formações ígneas e metamórficas fissuradas;

Tipo 6 – sistema aquífero cujo suporte litológico é constituído por formações ígneas e metamórficas pouco fissuradas e ou alteradas.

#### VALORES DE POROSIDADE EFICAZ

Material		Porosidade eficaz (percentagem)			Observações
Tipo	Descrição	Média	Máxima	Mínima	
Rochas maciças	Granito	< 0,2	0,5	0	(a)
	Calcário	< 0,5	1	0	(b)
	Dolomito	< 0,5	1	0	(b)
Rochas metamórficas		< 0,5	2	0	(a)
Rochas vulcânicas	Piroclastos	< 5	20	0	(c) (e)
	Escórias	20	50	1	(c) (e)
	Tufos vulcânicos	< 5	20	0	(d)
	Basaltos densos, fonólitos	< 1	2	0,1	(a)
	Basaltos vacuolares	5	10	1	(c)
Rochas sedimentares consolidadas	Rochas foliadas	< 2	5	0	(e)
	Arenitos	10	20	0	(f)
	Calcário detrítico	3	20	0,5	-
Rochas sedimentares não consolidadas	Aluviões	15	35	5	(e)
	Dunas	20	30	10	-
	Cascalheiras	25	35	15	-
	Areias	25	35	10	-
	Depósitos glaciares	15	30	5	-
	Lodos	10	20	2	(e)
	Argilas não compactadas	2	10	0	(e)
	Solos de cobertura	10	20	1	(e)

(a) A porosidade eficaz aumenta devido à meteorização.

(b) A porosidade eficaz aumenta devido a fenómenos de dissolução.

(c) A porosidade eficaz diminui com a idade.

(d) A porosidade eficaz pode aumentar com a idade.

(e) A porosidade eficaz varia muito segundo as circunstâncias e o tempo.

(f) A porosidade eficaz varia segundo o grau de cimentação e solubilidade.

## ANEXO I I

MINISTÉRIOS DA ECONOMIA E DAS CIDADES, ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO E AMBIENTE

Portaria n.º 203/2003

**de 7 de Março**

Considerando que o regime geral de revelação e aproveitamento dos recursos geológicos, instituído pelo Decreto-Lei n.º 90/90, de 16 de Março, estabelece o princípio de que nos casos de exploração de recursos hidrominerais deverá ser fixado, com fundamento em estudo hidrogeológico, um perímetro de protecção para garantir a disponibilidade e características da água, bem como condições para uma boa exploração;

Considerando que o perímetro de protecção abrange três zonas, imediata, intermédia e alargada, em relação às quais os artigos 42.º, 43.º e 44.º do citado Decreto-Lei

n.º 90/90, de 16 de Março, estabelecem e permitem estabelecer proibições ou condicionantes ao exercício de certas actividades;

Considerando que o INATEL — Instituto Nacional para Aproveitamento dos Tempos Livres dos Trabalhadores, titular do contrato de exploração da água mineral natural número HM-23, denominada de Entre-os-Rios (Quinta da Torre), sita na freguesia de Eja, concelho de Penafiel, distrito do Porto, veio propor, ao abrigo do artigo 27.º do Decreto-Lei n.º 86/90, de 16 de Março, a delimitação do referido perímetro de protecção, apresentando para o efeito uma proposta fundamentada em estudo hidrogeológico e contendo uma planta topográfica com indicação das zonas imediata, intermédia e alargada;

Considerando que tal proposta foi aprovada, nos termos do n.º 3 do artigo 27.º do Decreto-Lei n.º 86/90, de 16 de Março:

Manda o Governo, pelos Ministros da Economia e das Cidades, Ordenamento do território e Ambiente, ao abrigo do disposto no n.º 1 do artigo 27.º do Decreto-Lei n.º 86/90, de 16 de Março, que, para efeitos do disposto nos artigos 42.º, 43.º e 44.º do Decreto-Lei

n.º 90/90, de 16 de Março, seja fixado o perímetro de protecção da água mineral natural a que corresponde o número HM-23 de cadastro e a denominação de Entre-os-Rios (Quinta da Torre), cujas zonas e respectivos limites se indicam, em coordenadas rectangulares planas, no sistema Hayford-Gauss, referidas no ponto central:

Zona imediata — definida por um círculo de 30 m de raio, cujo centro é definido pela captação Barbeitos:

Captação	Distância à meridiana (metros)	Distância à perpendicular (metros)
Barbeitos	- 13 680	+ 158 900

Zona intermédia — delimitada por polígono BADC, cujos vértices têm as seguintes coordenadas:

Vértice	Distância à meridiana (metros)	Distância à perpendicular (metros)
B	- 13 988	+ 158 450
A	- 13 988	+ 159 915
D	- 13 188	+ 159 400
C	- 13 188	+ 158 450

Zona alargada — delimitada pelo polígono EFGH, cujos vértices têm as seguintes coordenadas:

Vértice	Distância à meridiana (metros)	Distância à perpendicular (metros)
E	- 14 188	+ 158 300
F	- 14 188	+ 160 315
G	- 12 988	+ 160 315
H	- 12 988	+ 158 300

Em 30 de Janeiro de 2003.

Pelo Ministro da Economia, *Maria Dulce Farinha Franco Vilhena de Carvalho*, Secretária de Estado Adjunta do Ministro da Economia. — Pelo Ministro das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente, *José Mário Ferreira de Almeida*, Secretário de Estado Adjunto e do Ordenamento do Território.

