



Instituto Politécnico de Castelo Branco
Escola Superior de Tecnologia

Delimitação de Perímetros de Protecção para as Captações das Eirinhas - Distrito de Castelo Branco

Miguel Lopes Poças de Sousa

Trabalho de Mestrado
Mestrado de Infra-estruturas de Construção Civil

Trabalho efectuado sob orientação da Professora
Doutora Maria Teresa Durães Albuquerque e co-orientação
da Professora Doutora Isabel Margarida Horta Ribeiro Antunes

Agosto 2011

Anexo 1

DECLARAÇÃO

Nome

Miguel Lopes Poças de Sousa

E-mail: mlpsousas@gmail.com Telefone: 962448424

Bilhete de Identidade: 11313258

Título do trabalho

Delimitação de Perímetros de Protecção para as captações das Eirinhas -
Distrito de Castelo Branco

Orientador(es): Orientadora Professora Doutora Maria Teresa Durães
Albuquerque e Co-orientadora Professora Doutora Isabel Margarida Horta
Ribeiro Antunes Ano de conclusão: 2011

Designação do Mestrado:

Infra-Estruturas de Construção Civil

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A
REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO.

Instituto Politécnico de Castelo Branco, 24/08/2011

Assinatura: _____

DELIMITAÇÃO DE PERÍMETROS DE PROTECÇÃO PARA AS CAPTAÇÕES DAS EIRINHAS - DISTRITO DE CASTELO BRANCO

Miguel Lopes Poças de Sousa

Dissertação apresentada ao Instituto Politécnico de Castelo Branco para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Infra-estruturas de Construção Civil, realizada sob a orientação científica da Doutora Maria Teresa Durães Albuquerque, Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco e co-orientação científica da Doutora Isabel Margarida Horta Ribeiro Antunes, Professora Adjunta do Departamento de Silvicultura e Recursos Naturais da Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Aos meus pais

Agradecimentos

Ao longo desta caminhada quero expressar a minha gratidão a todos os que estiveram comigo, pelas sugestões, conselhos e conhecimentos que me transmitiram.

Assim cumpre agradecer:

- À minha orientadora Prof. Doutora Maria Teresa Durães Albuquerque pelos importantes esclarecimentos e conhecimentos transmitidos, assim como pela sua incansável disponibilidade em todas as fases deste trabalho e revisão crítica;
- À minha co-orientadora Prof. Doutora Isabel Margarida Horta Ribeiro Antunes pela atenção dispensada no reconhecimento de campo da zona em estudo, transmissão de conhecimentos e revisão crítica do texto;
- Ao Departamento de Engenharia Civil pela disponibilização de material de campo e pela cedência do uso das instalações do Laboratório de Geotecnia;
- À Empresa Águas do Centro, SA pela disponibilização das condições logísticas e institucionais indispensáveis para a elaboração da Tese;
- Aos funcionários da Estação de Tratamento de Águas de Santa Águeda pela disponibilidade demonstrada ao longo do período referente aos ensaios de laboratório das águas recolhidas;
- Ao Sr. Fernando responsável pela manutenção das captações de Casal das Serra, pela disponibilidade que sempre mostrou ao longo do período de recolhas de campo nas captações das Eirinhas 1 e 2;
- Aos meus colegas de mestrado pelo companheirismo e troca de ideias;
- Aos meus queridos pais e à minha irmã pelo apoio e incentivo que me deram ao longo deste percurso;
- À minha querida Nádia, pela troca de ideias e diversas sugestões feitas ao longo do trabalho e acima de tudo pelo companheirismo e compreensão;

A todos um Obrigado.

Palavras chave

Eirinhas, Perímetros de Protecção, DRASTIC, Wyssling, Raio Fixo

Resumo

A crescente necessidade de suprir as carências de água para consumo urbano, aliada à inquestionável importância que as águas subterrâneas assumem em termos de quantidade e qualidade, leva a uma consciencialização para a protecção deste recurso face ao risco inerente das actividades humanas.

Os perímetros de protecção, e as respectivas restrições a eles associadas, revelam-se uma ferramenta imprescindível na protecção de estas fontes de riqueza natural.

Na primeira fase deste estudo, é introduzido o de perímetro de protecção, um enquadramento legislativo do mesmo e alguns conceitos hidrogeológicos necessários à sua definição.

Na segunda fase deste estudo são apresentados critérios e alguns métodos existentes para a delimitação dos perímetros de protecção, dando-se maior destaque aos métodos analíticos de Wyssling e do Raio Fixo, utilizados no caso de estudo deste trabalho.

Na terceira e última parte, é desenvolvida a componente prática deste trabalho, faz-se o enquadramento da área em estudo e são apresentadas as captações analisadas; aplicam-se o método sugerido pela legislação em vigor e o método de Wyssling. Faz-se uma análise comparativa dos resultados obtidos, tecendo-se algumas considerações finais.

Key words

Eirinhas, Protection perimeters, DRASTIC, Wyssling, Fixed Ray

Abstract

The growing need to overcome the scarcity of water for urban consumption, together with the unquestionable importance of the subterranean waters in terms of both quality and quantity, gives way to a growing awareness of the need for protection of such resources, due to the risks inherent of human activities.

The protection perimeters and its associated restrictions have become indispensable tools in the preservation of these sources of natural wealth.

In the first part of this study it is discussed the concept of protection perimeter, referred together with the portuguese legislation and other hydrogeological concepts necessary to its definition.

The second part of this study shows the current criteria and methods required for the delimitation of the protection perimeters, with greater attention being given to the analytical methods of Wyssling and the Fixed Ray, both used in the case study of this investigation.

The third and final part shows the empirical component of this investigation, presenting the wells that were part of the studied sample and applying the method suggested by the current portuguese legislation as well as the Wyssling method. The study is concluded with a comparative analysis of the results and some final comments.

Índice geral

1.	Introdução	1
1.1.	As Águas Subterrâneas	1
1.2.	Objectivos Principais.....	2
2.	Perímetros de Protecção	3
2.1.	Perímetro de Protecção - Definição	3
2.2.	Enquadramento legal em Portugal.....	6
3.	Considerações Hidrogeológicas na Definição de Perímetros de Protecção	8
3.1.	Aquíferos.....	8
3.2.	Zona Não Saturada	10
3.3.	Zona Saturada	11
3.4.	Extracção de Água subterrânea	12
4.	Vulnerabilidade e Poluição das Águas Subterrâneas	14
4.1.	Tipos de poluição de acordo com a sua origem e com a ocupação do solo.....	14
4.2.	Nível de protecção natural dos aquíferos - vulnerabilidade	16
4.3.	Nível de protecção natural associado ao tipo de aquíferos.....	17
4.4.	Avaliação da Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas à Poluição	19
5.	Critérios e Metodologias na delimitação de Perímetros de Protecção em captações de águas subterrâneas.....	25
5.1.	Critérios de delimitação dos Perímetros de Protecção	25
5.2.	Seleção do critério a aplicar	26
5.3.	Metodologias na delimitação de Perímetros de Protecção.....	28
5.3.1.	Métodos Geométricos.....	28
5.3.1.1.	Formas variáveis simplificadas	28
5.3.2.	Métodos analíticos	29
5.3.2.1.	Raio Fixo Calculado.....	29
5.3.2.2.	Equação de Fluxo Uniforme	34
5.3.2.3.	Método de Wyssling	35
5.3.3.	Métodos Numéricos	37
5.4.	Seleção dos métodos a aplicar	39
6.	Aplicação de Métodos Analíticos na Delimitação de Perímetros de Protecção para as Captações das Eirinhas - Distrito de Castelo Branco.....	41

6.1.	Enquadramento geográfico.....	41
6.2.	Enquadramento geológico.....	42
6.3.	Metodologia Usada	43
6.4.	Caracterização das Captações.....	44
6.5.	Caracterização da Água Captada.....	47
6.6.	Precipitação	49
6.7.	Balanço Hídrico	50
6.8.	Parâmetros utilizados na aplicação dos métodos seleccionados	54
6.9.	Condicionantes na aplicação dos Métodos de Wyssling e Raio Fixo a Captações de Mina	54
6.10.	Vulnerabilidade à Poluição - Índice DRASTIC	56
6.11.	Aplicação do Decreto-Lei nº 382/99 de 22 de Setembro	57
6.12.	Aplicação do Método de Wyssling	60
6.13.	Proposta de Perímetro de Captação para as Captações Eirinhas nº1 e nº2	64
7.	Considerações Finais	65
	Bibliografia	
	Anexo	

Índice de figuras

Figura 1 - Perímetros de Protecção	4
Figura 2 - Planta e Corte Transversal do Perímetro de Protecção.....	6
Figura 3 - Tipos de aquíferos	8
Figura 4 - Permeabilidade e impermeabilidade	9
Figura 5 - Circulação da água nos meios porosos, fracturados e cárlicos	10
Figura 6 - Zona saturada e Zona não saturada.....	11
Figura 7 - Terminologia usada na definição de perímetros de protecção de captações bombeadas em meio poroso	12
Figura 8 - Diferentes origens da poluição de águas subterrâneas	15
Figura 9 - Fluxo de água ascendente na camada confinante do aquífero	17
Figura 10- Fluxo descendente na camada confinante em consequência da descida do nível piezométrico.....	18
Figura 11 - Fluxo descendente em camada confinante de permeabilidade moderada.....	18
Figura 12 - Método DRASTIC	20
Figura 13 - Definição do perímetro de protecção utilizando o método das formas variáveis simplificadas.....	29
Figura 14 - Definição de perímetro de protecção utilizando o método do raio fixo calculado	30
Figura 15 - Perímetro de protecção utilizando a equação de fluxo uniforme	34
Figura 16 - Método de Wyssling	35
Figura 17 - Simulação da zona de contribuição em ASM-6.0.....	37
Figura 18 - Modelação em software de elementos finitos - FEFLOW.....	38
Figura 19- Deposição de detritos de pavimento betuminoso	43
Figura 20 - Esquema de principio da Mina Eirinha nº 2	45
Figura 21 - Captações - Interior da câmara de junção Figura 22 - Câmara de Junção	45
Figura 23 - Perímetro da zona de protecção da mina	55

Índice de gráficos

Gráfico 1 - Distribuição de água no planeta Terra	1
Gráfico 2 - Relação entre a Precipitação e o Caudal na Eirinha nº 1.....	46
Gráfico 3 - Relação entre a Precipitação e o Caudal na Eirinha nº 2.....	46
Gráfico 4 - Registos da Condutividade Eléctrica	47
Gráfico 5 - Registos do pH	47
Gráfico 6 - Registos da Temperatura.....	48
Gráfico 7 - Registos da Turvação	48
Gráfico 8 - Estimativa da precipitação mensal para o ano hidrológico 2009/10 na área em estudo	49
Gráfico 9 - Balanço Hídrico	52
Gráfico 10 - Excedentes e Défices Hídricos	53
Gráfico 11 - Consumo de Reservas e Restituição de Reservas.....	53

Índice de tabelas

Tabela 1 - Classificação qualitativa da vulnerabilidade em função do índice DRASTIC	19
Tabela 2 - Profundidade do topo do aquífero.....	20
Tabela 3 - Recarga do aquífero	21
Tabela 4 - Material do Aquífero.....	21
Tabela 5 - Tipo de solo	22
Tabela 6 - Topografia.....	22
Tabela 7 - Influência da zona não saturada	23
Tabela 8 - Condutividade hidráulica do aquífero.....	23
Tabela 9 - Factores de ponderação do método DRASTIC	24
Tabela 10- Critérios e processos físicos que estes controlam	26
Tabela 11 - Relação entre objectivos e critérios no traçado de perímetros de protecção	27
Tabela 12 - Relação entre o raio dos perímetros de protecção com os tipos de aquíferos.....	31
Tabela 13 - Valores da porosidade eficaz	31
Tabela 14 - Função de Poço $W(u)$	32
Tabela 15 - Critério utilizado nos diferentes métodos de delimitação de perímetros de protecção	39
Tabela 16 - Captações do Subsistema do Casal da Serra.....	44
Tabela 17 - Classificação das captações segundo o caudal médio medido	46
Tabela 18 - Evapotranspiração potencial - Método de Thornthwaite e Mather.....	51
Tabela 19 - Balanço Hidrológico para a zona das captações em estudo	52
Tabela 20 - Índice DRASTIC	56
Tabela 21 - Relação entre o Índice DRASTIC geral e o potencial à vulnerabilidade de acordo com Ferreira Gomes (2001)	56
Tabela 22 - Parâmetros de calculo para a Mina Eirinha nº1 - Método do Raio Fixo Calculado	58
Tabela 23 - Parâmetros de calculo para a Mina Eirinha nº2 - Método do Raio Fixo Calculado	59
Tabela 24 - Parâmetros de calculo para as Minas Eirinhas n.º 1 e n.º 2 - Método de Wyssling.....	60
Tabela 25 - Parâmetros que definem as zonas de protecção para a Eirinha n.º 1 - Método de Wyssling	61
Tabela 26 - Parâmetros que definem as zonas de protecção para a Eirinha n.º 1 - Método de Wyssling	62

Índice de mapas

Mapa 1 - Enquadramento Geográfico.....	41
Mapa 2 - Mapa Geológico de Portugal.....	42
Mapa 3 - Perímetro de protecção para a Mina Eirinha nº1 calculado pelo Método do Raio Fixo Calculado.....	58
Mapa 4 - Perímetro de protecção para a Mina Eirinha nº2 - calculado pelo Método do Raio Fixo Calculado.....	59
Mapa 5 - Perímetro de protecção para a Mina Eirinha nº1 - calculado pelo Método de Wyssling..	61
Mapa 6 - Perímetro de protecção para a Mina Eirinha nº2 - calculado pelo Método de Wyssling..	62
Mapa 7 - Proposta de Perímetro de protecção para as Minas Eirinhas nº1 e nº2 - Método de Wyssling	64

Lista de abreviaturas

ALTs	Armazenamento à superfície
ALT _{so}	Armazenamento no solo arável
ALT _{SSO}	Armazenamento no subsolo
APRH	Associação Portuguesa de Recursos Hídricos
ARMso	Armazenamento de água no solo
AVI	Aquifer Vulnerability Index
b	Espessura saturada
CAD	Capacidade de água utilizável pelas plantas
d	Rebaixamento
DEF	Défices hídricos
DRASTIC	D epth to Water, N et R echarge, A quifer Media, S oil Media, T opography, I mpact of the Vadose Zone Media, H ydraulic C onductivity of the Aquifer
EPA	Environmental Protection Agency
EPPNA	Equipa de Projecto do Plano Nacional da Água
ETA	Estação de Tratamento de Águas
ETP	Evapotranspiração potencial
ETP ₀	Evapotranspiração média
ETR	Evapotranspiração real
EXC	Excedentes hídricos
G	Escoamento subterrâneo
GOD	G roundwater occurrence, O verall aquifer class, D epth to groundwater table or strike
H	Espessura saturada
i	Gradiente hidráulico
IGM	Instituto Geológico Mineiro
INAG	Instituto da Água
IST	
ITGE	Instituto Tecnológico GeoMinero de España
K	Condutividade hidráulica
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
n	Porosidade eficaz
NEG-AC	Perda potencial de água
NP	Norma Portuguesa

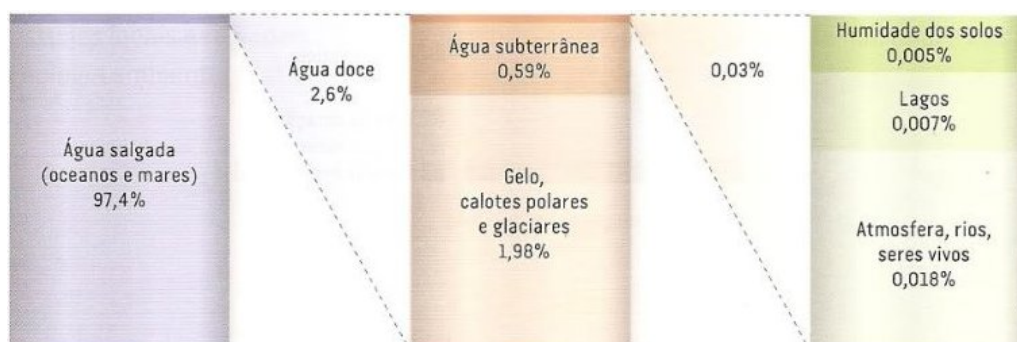
NUT	Nomenclatura das Unidades Territoriais
P	Precipitação
Q	Caudal
R	Distância à captação
r	Raio
R_s	Escoamento superficial
S	Coeficiente de armazenamento
SNIRH	Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos
t	Tempo
T	Transmissividade
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USGS	United States Geological Survey
v_e	Velocidade eficaz
x,y	Coordenadas
ZNS	Zona não saturada
ZS	Zona saturada

1. Introdução

1.1. As Águas Subterrâneas

Embora três quartos da superfície terrestre estejam cobertos por água, grande parte desta (97,4%) não é adequada para o consumo humano. Apenas 2,6% de toda a água do planeta constitui água doce, sendo que 1,98% se encontra aprisionada sob a forma de gelo em calotes polares e glaciares, e 0,03% se encontra distribuído pela humidade dos solos, lagos, rios, atmosfera e seres vivos (Gráfico 1).

Resta assim uma pequena quantidade de água que cai sobre a superfície terrestre se infiltra nos solos por acção da gravidade e origina a água subterrânea responsável pela recarga dos aquíferos.



Fonte: Portal de Estudos em Química (2011)
Gráfico 1- Distribuição de água no planeta Terra

Estas águas, além de mais protegidas contra a poluição e os efeitos da sazonalidade, apresentam em geral uma boa qualidade, decorrente da filtragem natural obtida como resultado da sua percolação no solo e subsolo. O seu aproveitamento tem-se revelado uma alternativa mais económica, evitando custos crescentes com barragens e adutoras e limitando o seu tratamento, na maioria dos casos.

A UNESCO¹ avalia que 75% do abastecimento público de água na Europa seja alimentado por água subterrânea, índice que chega de 90 a 100% na Alemanha, Áustria, Bélgica, Holanda e Suécia.

Actualmente, a água subterrânea assume um papel primordial no desenvolvimento socioeconómico de diversas regiões de Portugal, viabilizando as mais diversas actividades e constituindo, por vezes, a única fonte para o abastecimento de água.

A inquestionável importância que as águas subterrâneas assumem, em termos de quantidade, não só para o abastecimento público como privado, leva a concluir que é imprescindível a consciencialização de que a melhor forma de garantir a boa qualidade da água para consumo humano é proteger as suas origens.

¹ United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

1.2. Objectivos Principais

O objectivo deste trabalho consiste na aplicação de metodologias analíticas na definição de perímetros de protecção em torno de captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público. Como caso de estudo são analisadas as captações, Eirinha nº 1 e Eirinha nº 2, do subsistema do Casal da Serra pertencente ao sistema de abastecimento das Águas do Centro grupo Águas de Portugal.

Pretende-se analisar e comparar os resultados obtidos pela aplicação do método de Wyssling com a metodologia do Raio Fixo, sugerida pela legislação actualmente em vigor (Decreto-lei 382/99, de 22 de Setembro) em anexo.

2. Perímetros de Protecção

2.1. Perímetro de Protecção - Definição

O Decreto-Lei n.º 236/98 de 1 de Agosto, no n.º1, alínea a) do art.2.º, salienta, águas para consumo humano:

- a1) Águas doces superficiais destinadas à produção de água para consumo humano;
- a2) Águas subterrâneas destinadas à produção de água para consumo humano;
- a3) Águas de abastecimento para consumo humano.

O presente trabalho incide na alínea a2), nomeadamente na importância das águas subterrâneas e a sua relevância quer em termos de quantidade como qualidade, para o abastecimento público como para o privado.

Uma das formas mais antigas de proteger uma captação de água subterrânea, é restringir a utilização do terreno envolvente. Deste modo, os perímetros de protecção assumem-se como uma ferramenta para proteger e garantir a qualidade do aquífero a longo prazo.

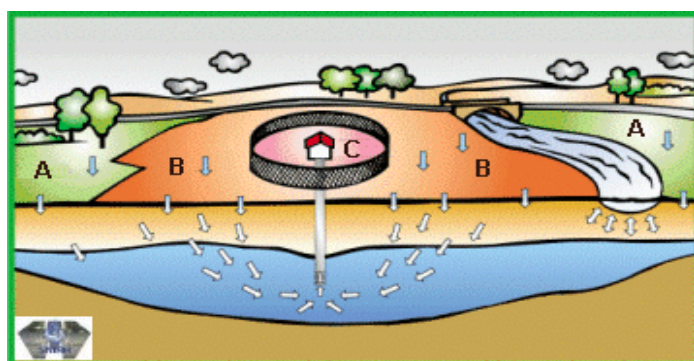
Segundo MOINANTE E FERREIRA (2004), um perímetro de protecção não é mais do que a área de superfície e subsuperfície envolvente de uma ou mais captações, destinadas ao abastecimento público, onde as actividades susceptíveis de alterar a qualidade da água subterrânea são limitadas, proibidas, ou regulamentadas de modo progressivo (as restrições diminuem com o aumento da distância à captação). Os limites da zona de protecção são definidos de modo a que os potenciais poluentes que alcancem a água subterrânea, na fronteira da zona de protecção ou fora dela, se degradem ou se tornem inofensivos antes de alcançarem a captação.

Para CRUZ (1997), deve definir-se o perímetro de protecção suficiente para a protecção de um determinado aquífero e dos seus meios de exploração, isto é, as suas zonas de protecção não devem ter dimensões demasiado exíguas, de modo a perderem a eficácia, nem exageradamente extensas, acarretando uma série de servidões administrativas com consequências desastrosas no desenvolvimento, e portanto na economia. O equilíbrio adequado das dimensões do perímetro de protecção será tanto maior, quanto mais aprofundado for o conhecimento científico e técnico de um aquífero e das captações a proteger.

Este problema é abordado no Decreto-Lei n.º382/99 de 22 de Setembro, que define Perímetro de Protecção no n.º1, alíneas a), b), c) do art.3.º como uma área contígua à captação na qual se interdita ou condicionam as instalações e as actividades susceptíveis de poluírem as águas subterrâneas, no qual define três zonas distintas:

- a) Zona de protecção imediata: área da superfície do terreno contígua à captação em que, para 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 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.

A Figura 1 permite visualizar de uma forma esquemática, as três zonas de protecção definidas anteriormente.



Legenda :

- Zona de Protecção Alargada
- Zona de Protecção Intermédia
- Zona de Protecção Imediata

Fonte: INAG-DSRH-DRsub (1999)

Figura 1 - Perímetros de Protecção

Este diploma destaca que os perímetros de protecção das captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público visam:

- Prevenir, reduzir e controlar a poluição das águas subterrâneas por infiltrações de águas pluviais lixiviantes e de águas excedentes de rega e de lavagem;
- 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 de águas subterrâneas, em situações de poluição acidental dessas águas.

MOINANTE E FERREIRA (2004), salienta que os principais objectivos a ter em conta, no que se refere aos perímetros de protecção, dever-se-ão basear nos seguintes pontos:

- Evitar a chegada de substâncias poluentes à captação, devido a variações do fluxo de água subterrânea como consequência de variações na extracção de água na captação, eventuais descargas ou deposições, acidentais ou não, em zonas mais vulneráveis, e infiltração de águas pluviais ou excedentes de água de rega e de lavagem.
- Assegurar a atenuação do poluente durante o seu percurso entre o foco de poluição e a captação, por actuação dos processos naturais de diluição e de autodepuração,
- Recorrer, atempadamente a fontes de abastecimento alternativas, em caso de descargas acidentais de poluentes que coloquem em perigo o sistema de abastecimento público,
- Garantir a protecção das águas subterrâneas no interior da zona de contribuição da captação.

Deste modo, os perímetros de protecção devem ter em linha de conta, uma defesa tanto quantitativa como qualitativa dos recursos hidrominerais e da sua exploração.

Na definição dos perímetros de protecção conta-se com o auxílio de estudos hidrogeológicos rigorosos que permitem, de uma forma sustentável, definir as áreas a intervir. Os conceitos de vulnerabilidade e risco de poluição assumem uma importância relevante. Por vulnerabilidade deveremos considerar as qualidades ou propriedades de um determinado aquífero no que se refere à sua maior ou menor capacidade de autoprotecção à poluição, enquanto por risco de poluição o resultado expectável, no aquífero, resultante das actividades antrópicas actuais ou potenciais, exercidas nas zonas onde existe risco de poluição.

De entre os vários métodos de avaliação da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas, destacam-se os métodos AVI², GOD³, EPPNA⁴ e DRASTIC⁵.

Para além destes conceitos, as diferentes áreas dos perímetros de protecção devem permitir a aplicação de medidas de carácter logístico, paliativas ou correctivas, no caso de se verificar um acidente dentro de uma delas, ou restringir de tal modo as actividades de forma a que ocorrências de tais acidentes, tenham uma pequena probabilidade de surgir.

Uma medida de controlo da poluição de águas subterrâneas, é a construção de furos de monitorização, que têm como objectivo a observação, o controlo e alerta sobre a qualidade da água. Estes furos, bem posicionados num sistema aquífero, detectam a passagem de agentes poluidores, permitindo uma actuação correctora, antes que estes atinjam as captações.

Outra medida passa pelo controlo contínuo da água das captações, feito imediatamente à saída destas ou dos circuitos de adução. Estes sistemas permitem enviar através de sensores valores de medições de diferentes parâmetros químicos e físicos da água, e estão quase sempre, ligados a meios informáticos. Com este controlo consegue-se excluir uma parte considerável de qualquer risco de poluição.

² Aquifer Vulnerability Index, desenvolvido pelo National Research Institute

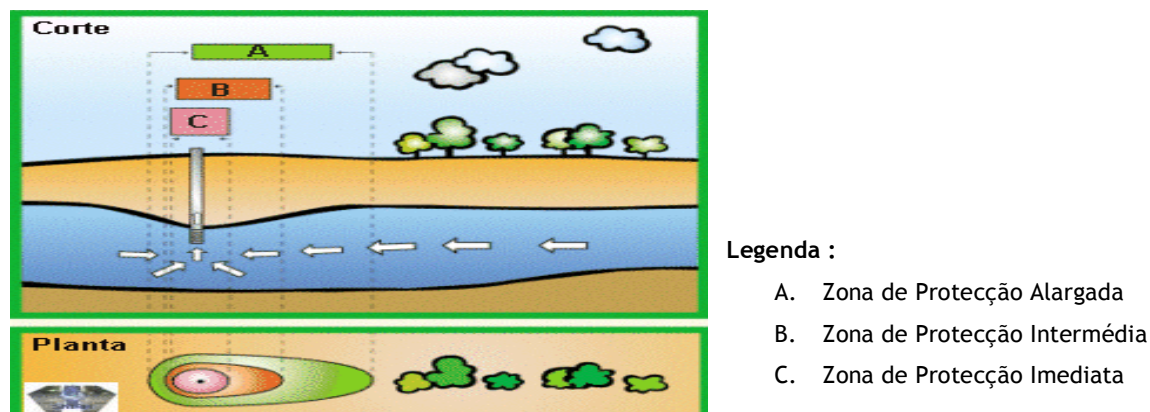
³ Groundwater occurrence, Overall aquifer class, Depth to groundwater table or strike (Foster, 1987)

⁴ Equipa de Projecto do Plano Nacional da Água

⁵ Depth to Water, Net Recharge, Aquifer Media, Soil Media, Topography, Impact of the Vadose Zone Media, Hydraulic Conductivity of the Aquifer (Aller et al., 1987)

Com efeito, no âmbito da realização de estudos hidrogeológicos, pode recorrer-se a vários critérios para a delimitação das zonas passíveis de protecção tendo em conta as características do aquífero interceptado pela captação.

A Figura 2 apresenta, planta e corte esquemáticos, para a determinação de perímetros de protecção na qual se delimitam as três zonas anteriormente referidas.



Fonte: INAG-DSRH-DRsub (1999)

Figura 2 - Planta e Corte Transversal do Perímetro de Protecção

2.2. Enquadramento legal em Portugal

O primeiro instrumento jurídico-legal de zona de defesa bacteriológica, vigente em Portugal refere-se ao Decreto-Lei nº 15/401, de 17 de Abril de 1928, que aborda o problema das águas subterrâneas e a necessidade de se criarem mecanismos de defesa e salvaguarda dos recursos, referido no art.25.º deste Decreto-lei.

Em 1971, foi criada a Norma Portuguesa NP- 836 (NP,1971), que veio estabelecer duas zonas de protecção sanitária referentes às captações. Uma zona de protecção “próxima” delimitada por vedação, e outra de protecção “à distância”, onde se definem as estruturas e/ou actividades que não devem existir no seu interior. A extensão das referidas zonas, por princípio, correspondia a uma área circular em torno da captação e cujo raio variável, era apenas função da permeabilidade e da capacidade de filtração do terreno.

Contudo, sendo este um instrumento insuficiente e já largamente desadequado, foi publicado em Portugal no ano de 1990 um conjunto legislativo, referente a recursos geológicos, que integra a figura de Perímetro de Protecção para as águas minerais naturais e de nascente.

O Decreto-Lei nº84/90, no seu artigo 5.º, aplicável ao aproveitamento de águas de nascente, nos termos do disposto no art.12.º do Decreto-Lei n.º 90/90, orienta para a definição de um perímetro de protecção. Também o Decreto-Lei n.º 86/90, no nº 2 do artigo 27 e artigo 29.º, fazem referência às propostas de perímetro de protecção e à forma como essas propostas devem ser apresentadas e instruídas, assim:

“Art.27.º, n.º2 - A proposta do perímetro de protecção deverá ser apresentada pelo concessionário na Direcção-Geral, instruída, nomeadamente, com os seguintes documentos, estudo hidrogeológico na qual se fundamente, planta topográfica, em escala adequada, com a indicação das zonas imediata, intermédia e alargada.”

“Art.29.º- Constitui obrigação do concessionário, relativamente às zonas de protecção legalmente definidas, comunicar à Direcção-Geral, para efeitos de garantia efectiva dos recursos, quaisquer factos ou situações nelas verificadas.”

O artigo 12º do Decreto-Lei n.º 90/90, aprova e legitima a protecção dos recursos e as condicionantes das actividades. O nº 4, alíneas a) e b) deste mesmo artigo, determina que nos casos de exploração de recursos hidrominerais, este será fundamento de estudo hidrogeológico, e será fixado um perímetro de protecção para garantir a disponibilidade e características da água, facilitando as condições para uma boa exploração, abrangendo três zonas: zona de protecção imediata, zona de protecção intermédia e zona de protecção alargada, definidas nos artigos 42º, 43º e 44º, respectivamente, do Decreto-lei nº 90/90 e de 22 de Fevereiro de 1994.

O Decreto-Lei n.º45/94, regula os recursos hídricos bem como a elaboração e aprovação de planos. O nº 1 do artigo 3º determina as Zonas de Protecção bem como a classificação de determinadas zonas. Nomeadamente bacias ou parte de bacias, aquíferos ou massas de água, que pelas suas características naturais e valor ambiental, económico ou social assumem interesse público.

Também o Decreto-Lei nº46/94, no seu artigo 22.º, estabelece o regime de utilização, sob jurisdição do Instituto da Água (INAG), da necessidade de definição de áreas de protecção para captações.

Em 1 de Agosto de 1998 é publicado o Decreto-Lei nº236/98, em que o artigo 18.º estabelece normas, critérios e objectivos de qualidade com finalidade de proteger o meio aquático e melhorar a qualidade das águas em função dos seus principais usos. Assim o art.18.º do referido Decreto-Lei, fixa as áreas de protecção das captações de águas subterrâneas.

Posteriormente, a 22 de Setembro foi publicado o Decreto-Lei nº382/99, em que o nº 1 do artigo 1.º estabelece as normas e os critérios para a delimitação de zonas de protecção de captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público, designados por Perímetros de Protecção, com a finalidade de proteger a qualidade das águas dessas captações.

O n.º2 do artigo 1º do referido Decreto-Lei, designa que 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 m³/dia ficam abrangidas pelo disposto no referido diploma para todas as zonas de protecção previstas e definidas.

Ainda o nº 1 do art.3.º do supracitado Decreto-Lei, apresenta a definição de perímetro de protecção onde refere as três zonas de protecção que o constituem: **Zona de Protecção Imediata, Zona de Protecção Intermédia e Zona de Protecção Alargada.**

Também o art.6.º, apresenta quais as actividades e respectivas instalações, em cada uma das zonas de protecção, que poderão ser interditas ou condicionadas caso se demonstre que são susceptíveis de provocar a poluição das águas subterrâneas.

3. Considerações Hidrogeológicas na Definição de Perímetros de Protecção

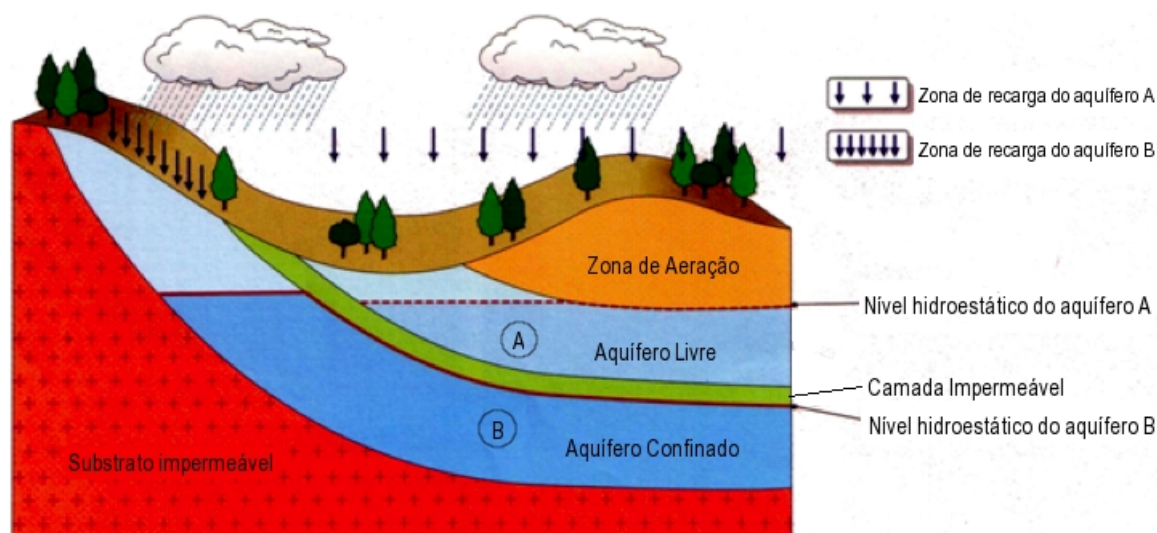
3.1. Aquíferos

Como aquífero entende-se uma formação ou grupo de formações geológicas, com capacidade para armazenar e transmitir quantidades de água economicamente rentáveis.

Podem identificar-se dois tipos de aquíferos segundo o IGM⁶ (2001), visível na Figura 3.

Aquífero livre: Formação geológica permeável e parcialmente saturada de água sendo limitada na base por uma camada impermeável; neste caso o nível de água no aquífero está à pressão atmosférica e a sua recarga faz-se pelas camadas que estão por cima.

Aquífero confinado: Formação geológica permeável e completamente saturada de água, sendo limitada no topo e na base por camadas impermeáveis, neste caso a pressão da água no aquífero é superior à pressão atmosférica e a sua recarga é feita lateralmente e não pela camada que está por cima.



Fonte: Fernandes, J., (2009)
 Figura 3 - Tipos de aquíferos

Podem ainda definir-se outras estruturas hidrogeológicas, tais como (IGM, 2001):

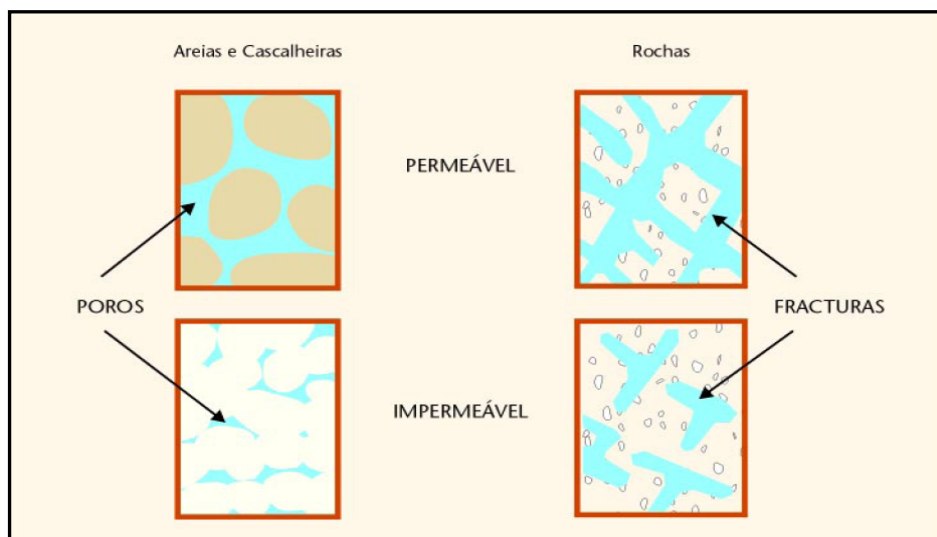
Aquitardo: Formação geológica que pode armazenar água mas que a transmite lentamente, não sendo rentável o seu aproveitamento a partir de poços.

Aquicludo: Formação geológica que pode armazenar água mas não a transmite (água não circula).

Aquífugo: Formação geológica impermeável que não armazena nem transmite água.

Para que haja água subterrânea explorável, esta tem que atravessar e circular através das formações geológicas que têm de ser porosas e permeáveis (Figura 4). Ou seja, o meio deve apresentar características favoráveis de porosidade e permeabilidade, permitindo armazenar e libertar água.

⁶ Instituto Geológico Mineiro



Fonte: IGM (2001)

Figura 4 -Permeabilidade e impermeabilidade

Tendo em conta o meio de escoamento, os aquíferos poderão ser porosos, fracturados, mistos (porosos e fracturados) e cársicos (Figura 5).

Nos **aquíferos porosos**, os poros existentes representam os espaços que se formam entre os grãos quando o sedimento se depositou originalmente. Uma particularidade deste tipo de aquífero é a sua porosidade quase sempre homogeneamente distribuída, permitindo que a água flua em qualquer direcção (isotropia), em função dos diferenciais de pressão hidrostática ali existente. O fluxo de água subterrânea é controlado pela direcção do gradiente no meio poroso, e a velocidade da água pode ser calculada pela Lei de Darcy.

Nos aquíferos porosos podem no entanto surgir fracturas devido a pressões aplicadas sobre o aquífero. Estas fracturas apresentam normalmente uma direcção preferencial de orientação, relacionada com as tensões aplicadas, provocando deste modo uma anisotropia no sistema aquífero. A água subterrânea é forçada a circular ao longo das fracturas cuja direcção faz um determinado ângulo com a direcção do gradiente hidráulico. Em consequência, a Lei de Darcy não poderá ser aplicada uma vez que assume fluxo laminar.

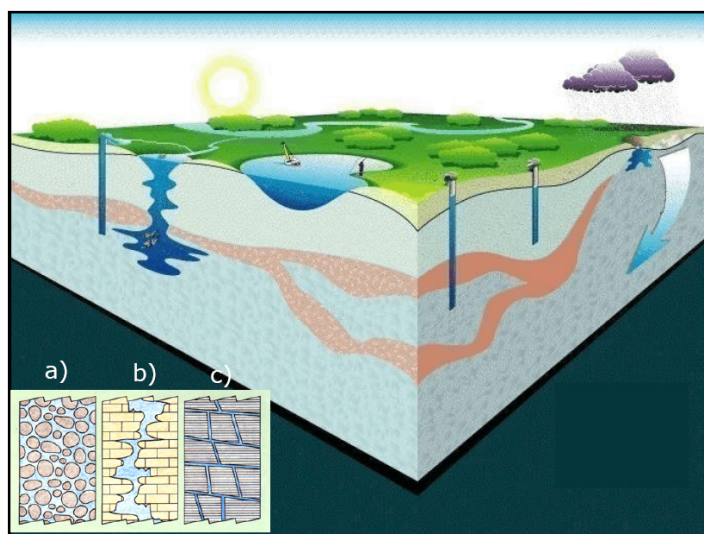
Os **aquíferos fracturados** ou fissurados estão geralmente associados a rochas ígneas e metamórficas, onde a água circula através de fracturas ou pequenas fissuras.

Os **aquíferos cársicos** ocorrem em rochas solúveis, geralmente zonas calcárias e dolomíticas. Segundo a EPA⁷ (1994), o termo cársico deverá ser aplicado no caso de aquíferos carbonatados. Constituem um tipo peculiar de aquífero fracturado, onde as fracturas, devido à dissolução do carbonato pela água, podem atingir aberturas muito grandes, criando verdadeiros rios subterrâneos. O fluxo de água nestes aquíferos pode ser difuso ou por condutas, podendo também ocorrer uma mistura dos dois tipos de fluxo.

Os aquíferos carsificados e fracturados podem ocorrer sob diversas condições de confinamento. Em condições livres ou de fraco confinamento, estes podem apresentar elevadas velocidades de fluxo perante recargas rápidas motivadas por fortes precipitações. O tempo de transporte nestes aquíferos é consequentemente muito menor que o de aquíferos em meio

⁷ Environmental Protection Agency

poroso, o que os torna mais vulneráveis à poluição. A legislação portuguesa refere que no caso de zonas que apresentem conexão hidráulica por condutas cársicas ou fissuras, o perímetro de protecção pode incluir zonas de protecção especial com restrições idênticas às da zona de protecção imediata.



Legenda:

- a) Meio Poroso
- b) Meio Cársico
- c) Meio Fracturado

Fonte: APRH⁸, (2011)

Figura 5 - Circulação da água nos meios porosos, fracturados e cárnicos

3.2. Zona Não Saturada

A **zona não saturada** situa-se imediatamente abaixo da superfície topográfica e acima do nível freático, onde os espaços vazios entre as partículas estão parcialmente preenchidos por gases (essencialmente ar e vapor de água) e por água à pressão atmosférica (LNEG⁹, 2011).

Nesta zona coexistem três subdomínios que são a zona de humidade do solo, a zona intermédia e a franja capilar, como se pode observar no corte esquemático da Figura 6.

A zona de humidade do solo situa-se na parte mais superficial da zona não saturada, onde a perda de água de adesão para a atmosfera é intensa. Esta constitui o subdomínio mais activo do ponto de vista químico e biológico. As reacções físico-químicas que aqui ocorrem podem modificar os tempos de residência ou de propagação, a concentração e a natureza dos poluentes (Pfannkuch, 1991).

A zona intermédia está compreendida entre a base da zona de humidade e o topo da franja capilar. Segundo Pfannkuch (1991), este subdomínio encontra-se parcialmente saturado com água capilar, ar e eventuais poluentes líquidos não miscíveis (e.g. hidrocarbonetos líquidos).

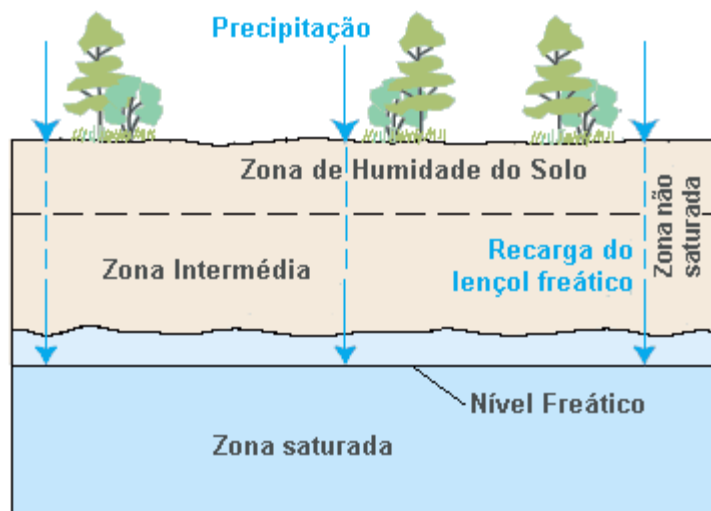
A franja capilar corresponde à transição entre a zona não saturada e a zona saturada. O limite entre a zona de capilaridade e a zona saturada não é um limite estático, variando significativamente em função das condições meteorológicas e da quantidade de água infiltrada.

⁸ Associação Portuguesa de Recursos Hídricos

⁹ Laboratório Nacional de Energia e Geologia

Este limite que separa a franja capilar da zona saturada chama-se nível freático e corresponde à superfície livre da zona saturada que entra em contacto com a zona não saturada. A água existente neste subdomínio é retida pelas forças capilares do meio poroso, encontrando-se em contacto directo com a água subterrânea, apesar de não fazer parte do seu fluxo. Este subdomínio constitui uma barreira ao fluxo descendente dos poluentes líquidos, que se espalham horizontalmente sobre a franja capilar, desde que mais leves que a água (Pfannkuch, 1991).

Apesar de apresentar uma capacidade limitada na degradação e transformação de poluentes conduzindo à sua atenuação ou até à eliminação, a zona não saturada constitui a primeira barreira à poluição das águas subterrâneas.



Fonte: Adaptado de USGS¹⁰

Figura 6 - Zona saturada e Zona não saturada

3.3. Zona Saturada

Na zona saturada todos os espaços porosos ou fracturas estão completamente preenchidos por água. O limite superior desta zona é designado nível freático. De acordo com Pfannkuch (1991), a zona saturada pode ser dividida em duas: a zona de flutuação da superfície piezométrica e a zona de fluxo da água subterrânea.

Na zona de flutuação da superfície piezométrica, embora a principal direcção do fluxo seja a horizontal, esta pode apresentar também uma componente vertical em virtude da subida e descida da superfície piezométrica nas situações de recarga e descarga, respectivamente. Esta componente vertical do fluxo constitui um importante factor na mobilização dos poluentes.

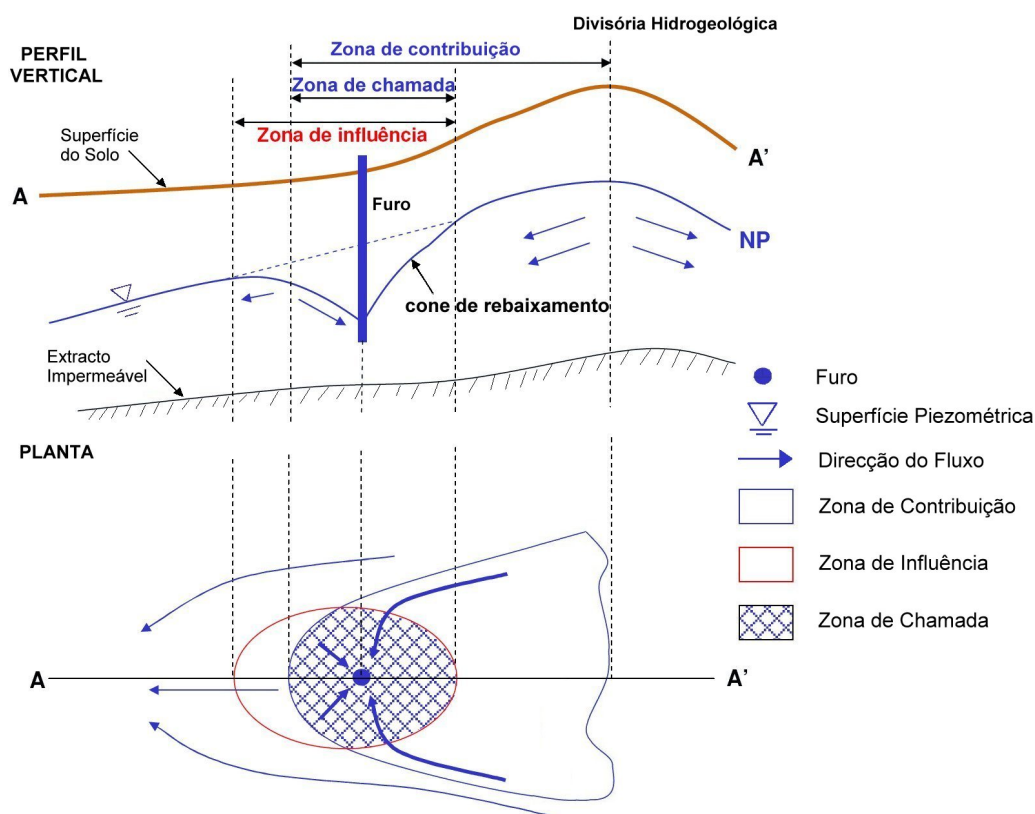
Na zona de fluxo da água subterrânea, o fluxo assume uma componente essencialmente horizontal transportando os poluentes por fenómenos de advecção e dispersão hidrodinâmica. O percurso das partículas poluentes é determinado tanto pela natureza do aquífero como pelas características físico-químicas dos materiais constituintes do aquífero, nomeadamente a sua condutividade hidráulica (K) e a sua porosidade eficaz (n).

¹⁰ United States Geological Survey

3.4. Extracção de Água subterrânea

A necessidade de suprir as carências de água para consumo humano leva à criação de estruturas de captação que nos permitam explorar reservas de água a grandes profundidades. Como consequência dessa extracção, ocorrem alterações no estado de equilíbrio natural dos aquíferos. Quando extraímos água de um furo, ocorre em torno deste a descida do nível piezométrico (rebaixamento), criando um gradiente hidráulico (uma diferença de pressão) entre este local e a sua vizinhança, como se pode observar na Figura 7. À área onde ocorre o rebaixamento do nível piezométrico, dá-se o nome de cone de rebaixamento (em secção transversal) ou zona de influência (em planta). Este gradiente provoca a escorrência de água de uma determinada área do aquífero, em direcção ao furo durante a extracção; a esta área chamamos zona de contribuição.

À parte da zona de contribuição na qual ocorre rebaixamento piezométrico e onde as linhas de fluxo se dirigem para a captação, dá-se o nome de zona de chamada (EPA 1987).



Fonte: Adaptado de EPA (1987)

Figura 7 - Terminologia usada na definição de perímetros de protecção de captações bombeadas em meio poroso

O rebaixamento do nível piezométrico possui uma forma cónica cujo eixo é o próprio furo. Este surge em resposta à necessidade da água fluir em direcção ao poço para repor o volume extraído. Nos aquíferos isotrópicos e com superfície piezométrica plana, a água tende a chegar de todas as direcções com a mesma velocidade, dando origem a uma superfície cónica relativamente simétrica, a zona de chamada e a zona de influência sobrepõem-se. Se o aquífero for anisotrópico, o contorno do rebaixamento do nível piezométrico será alongado segundo a direcção da menor velocidade de fluxo da água (Moinante, 2002).

A forma do cone de rebaixamento depende essencialmente do volume de água extraído e da permeabilidade do aquífero. Uma captação apresentará cones de rebaixamento diferentes, em função do volume de água extraído. Um maior volume de água extraído implica um rebaixamento maior, do nível piezométrico, em torno da captação. Por sua vez, a permeabilidade do aquífero, determina a velocidade com que a água se dirige para a captação. Quando a permeabilidade é elevada, grandes volumes de água atingem a captação num curto espaço de tempo, originando cones de rebaixamento pouco pronunciados. Se a permeabilidade do aquífero for pequena, o cone de rebaixamento será bastante pronunciado.

Um outro factor importante a considerar na extracção de águas subterrâneas é a presença de massas de água superficiais. Estas podem ser induzidas pelo fluxo de água subterrânea, iniciando ou aumentando a infiltração das mesmas, bem como de eventuais poluentes existentes na água superficial ou noutros segmentos do aquífero que se deslocarão em direcção à captação (Moinante, 2002).

4. Vulnerabilidade e Poluição das Águas Subterrâneas

4.1. Tipos de poluição de acordo com a sua origem e com a ocupação do solo

Assiste-se cada vez mais à destruição das capacidades e qualidades da água numa sociedade moderna e tecnologicamente avançada. Factores como o aumento da população, os resíduos industriais, os químicos agrícolas estão constantemente a contaminar os recursos hídricos.

No âmbito desta problemática salientam-se três tipos de poluição de acordo com a sua origem: doméstica, industrial e agropecuária.

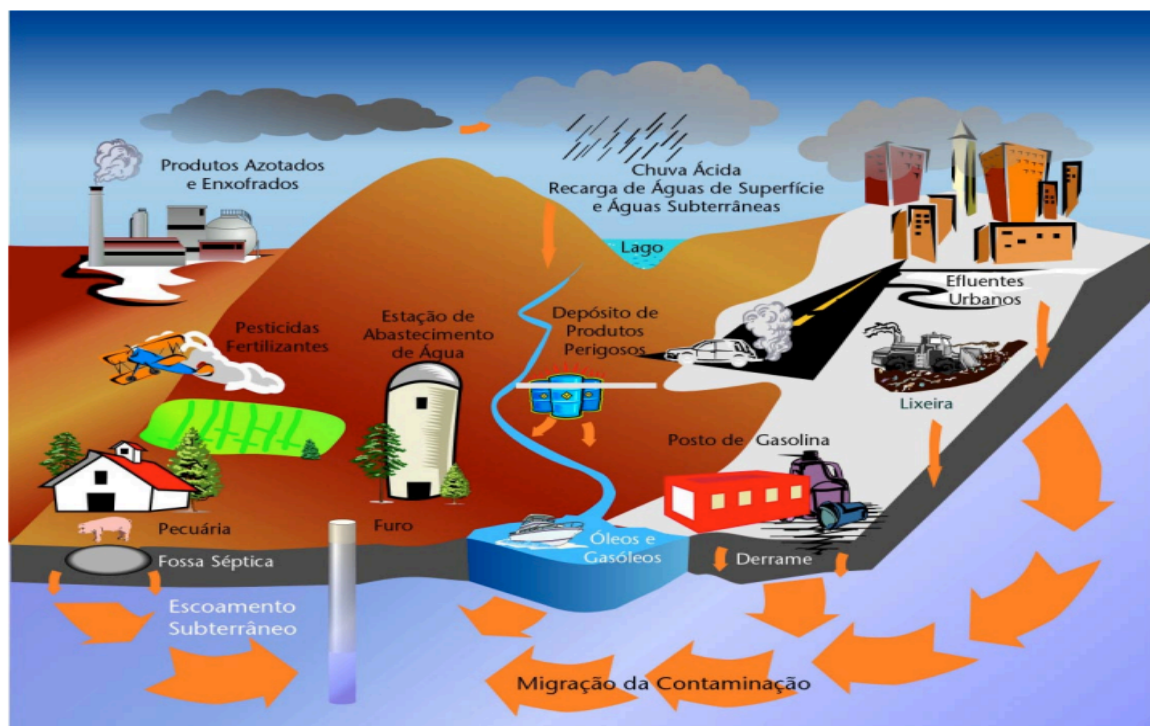
A poluição doméstica assume-se como uma fonte de poluição das águas, sobretudo em áreas com elevada densidade populacional. As águas residuais são na maior parte dos casos lançadas, sem qualquer tipo de tratamento, para rios, lagos e albufeiras o que implica pôr em risco a saúde pública (IGM, 2001).

O sector industrial é o maior poluidor, dado que grande parte das empresas utiliza enormes quantidades de água em diferentes processos de fabrico. Esta é utilizada na lavagem dos produtos onde lhe são adicionados detergentes, assim como numerosas substâncias químicas e tóxicas, que a tornam imprópria, sendo muitas vezes lançada directa ou indirectamente, nos rios, ribeiras, lagos, albufeiras e no mar sem qualquer tratamento. Estas águas vão-se infiltrar nos solos e contaminar as águas subterrâneas colocando em risco a saúde pública (IGM, 2001).

A poluição agro-pecuária é o resultado da utilização excessiva de fertilizantes e pesticidas na agricultura moderna. A elevada presença de dejectos, substâncias químicas, componentes das rações, bem como o uso de detergentes utilizados na lavagem de pocilgas e estábulos, contribuem para a poluição dos solos e a degradação dos recursos hídricos, quer superficiais, quer subterrâneos (IGM, 2001).

Deste modo, as águas subterrâneas estão cada vez menos potáveis, isto porque uma vez poluídas ficam durante um grande período de tempo contaminadas pois não contêm microorganismos que permitam a sua regeneração e degradação dos resíduos, tal como se verifica nos rios (IGM, 2001).

A Figura 8 refere-se aos vários tipos de poluição nas águas subterrâneas, sendo este um problema ao nível mundial e bastante preocupante, focado na Lei n.º58/2005 de 29 de Dezembro (Lei da água), que integra os conceitos de poluente e poluição, no Art4.º, alíneas ss) e tt).



Fonte: IGM, (2001)

Figura 8 - Diferentes origens da poluição de águas subterrâneas¹¹

Assim para as águas superficiais, o nº1 do art.46.º, menciona que “devem ser aplicadas as medidas necessárias para evitar a deterioração do estado de todas as massas de água superficiais.”, e no nº1 do art.47.º remete-se para as águas subterrâneas onde “devem ser aplicadas as medidas destinadas a evitar ou limitar a descarga de poluentes nas águas subterrâneas e prevenir a deterioração do estado de todas as massas de água”.

Tendo em conta a origem da fonte de poluição e sua dispersão pelo solo consideram-se três diferentes tipos:

Poluição pontual, Resultante do lançamento de poluentes num determinado local. A titulo de exemplo salienta-se os derrames acidentais de poluentes, lixeiras, descargas de instalações industriais e domésticas. Este tipo de poluição é de fácil localização e identificação, e consequente monitorização.

Poluição difusa, afecta uma área mais extensa o que significa que irá dispersar-se por uma área mais alargada, tornando mais difícil o seu controle e a possível recuperação dos aquíferos contaminados.

Neste tipo de poluição, a actividade agrícola é uma das grandes responsáveis, isto porque o uso excessivo e muitas vezes inadequado de fertilizantes, pesticidas e herbicidas, facilita a respectiva infiltração no solo e consequente contaminação dos aquíferos subterrâneos.

¹¹ Nota: Considera-se como **Poluente** qualquer substância susceptível de provocar poluição, definida em normativo próprio (Lei n.º58/2005 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. (Lei n.º58/2005 de 29 de Dezembro).

Poluição linear, este tipo de poluição de acordo com Leitão (1997), pode ocorrer quando a rejeição de poluentes se efectua ao longo de um determinado alinhamento, afectando principalmente as zonas envolventes do local de rejeição, destacando-se a zona a jusante.

Como exemplo deste tipo de poluição pode referir-se a rejeição de efluentes líquidos ao longo de valas ou de linhas de água, cursos de água poluídos, poluição ao longo de estradas e vias férreas, condutas de gás e de petróleo, e colectores de águas residuais.

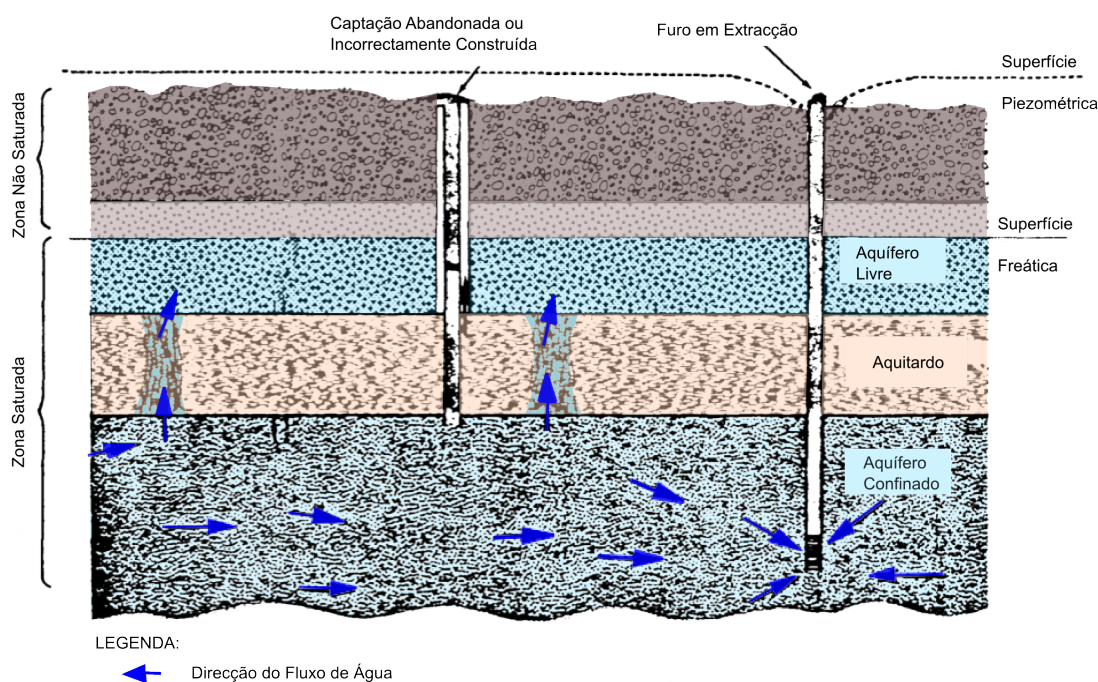
4.2. Nível de protecção natural dos aquíferos - vulnerabilidade

O conhecimento do nível de protecção natural de um aquífero, é de grande importância para a adopção de estratégias de protecção e gestão das massas de água subterrâneas.

A secção saturada e/ou não saturada de um aquífero tem a capacidade de imobilizar ou atenuar a concentração dos poluentes que a atravessam antes de alcançarem a captação. Essa atenuação é possível através de processos como a diluição, dispersão, absorção, adsorção, precipitação química ou degradação biológica, que actuam de modo diferente para cada poluente (ITGE, 1991; EPA, 1994).

4.3. Nível de protecção natural associado ao tipo de aquíferos

Os aquíferos confinados apresentam à priori características que lhes conferem menor vulnerabilidade relativamente aos aquíferos livres. São limitados por formações geológicas de baixa permeabilidade, encontrando-se normalmente a maiores profundidades onde a pressão da água é superior à atmosférica e elevando o nível da água (nível piezométrico) acima da base da camada confinante superior. O fluxo de água na camada confinante superior é geralmente ascendente o que dificulta a entrada de poluentes no aquífero, como se observa na Figura 9. A recarga do aquífero ocorre para além da extensão da camada confinante, em locais onde o aquífero não é confinado, o que sucede geralmente em zonas muito afastadas da captação.

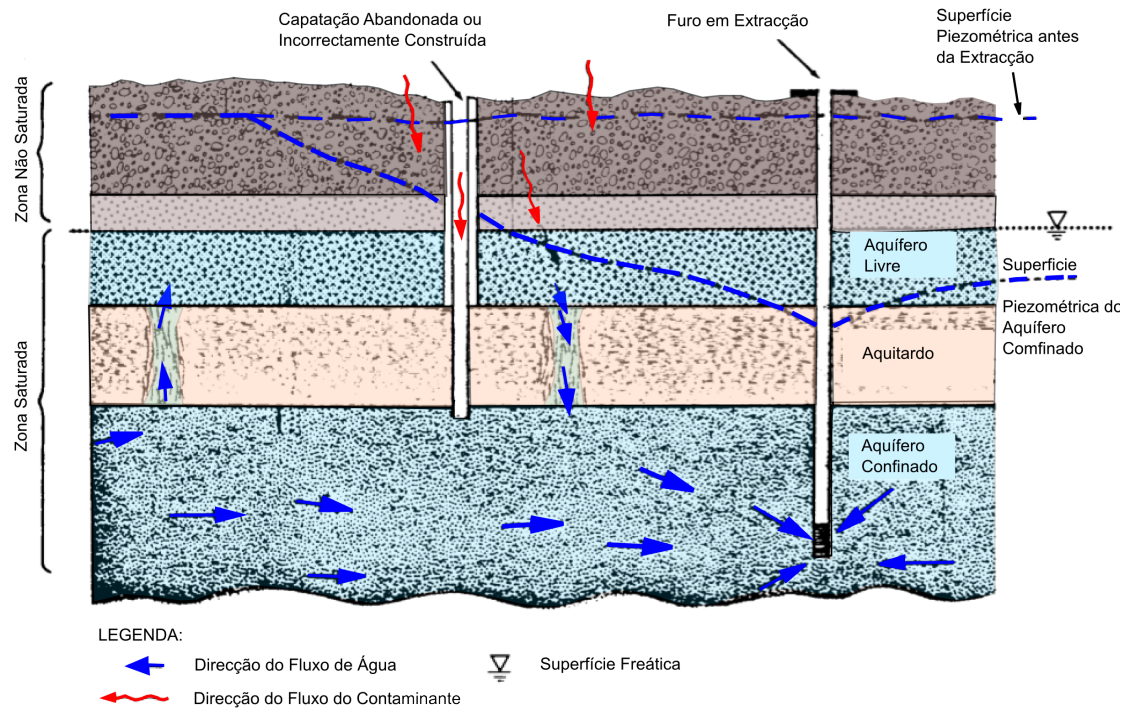


Fonte: Adaptado de Everett, (1987)

Figura 9 - Fluxo de água ascendente na camada confinante do aquífero

Segundo o EPA (1993), na presença de um aquífero verdadeiramente confinado, a definição de um perímetro de protecção em torno de uma captação não faz qualquer sentido, tornando-se suficiente a definição de uma zona imediatamente adjacente à captação de modo a impedir a circulação de poluentes no local de extracção.

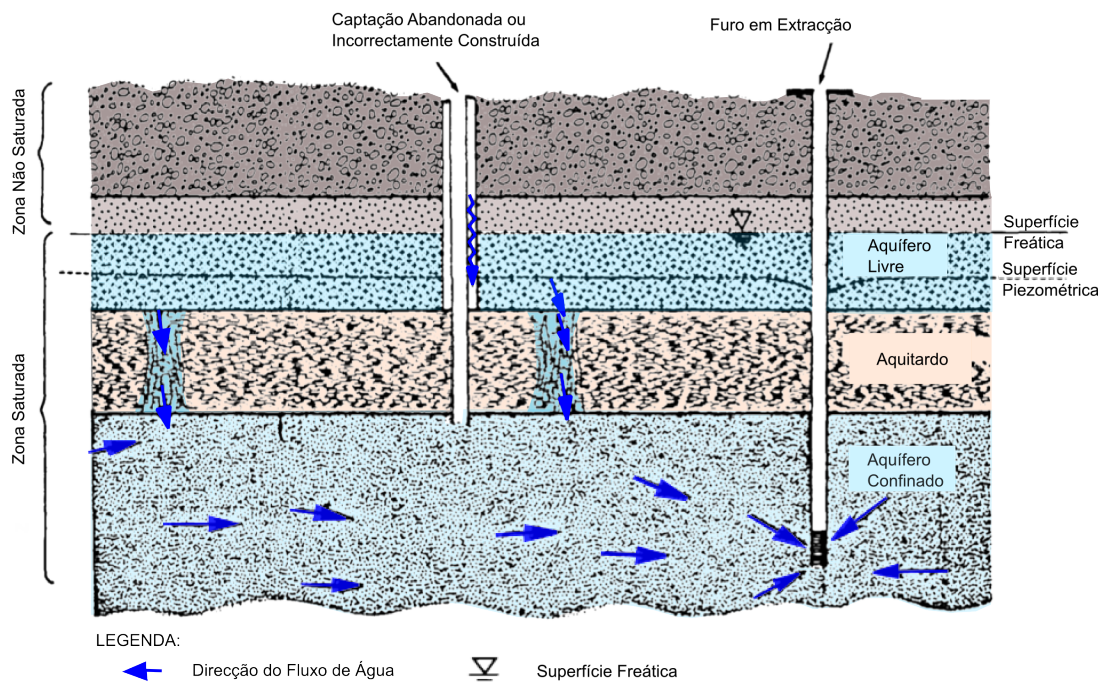
Este é, no entanto um pressuposto arriscado, uma vez que os aquitardos podem apresentar discontinuidades relacionadas com variações locais dos materiais constituintes, falhas, fracturas, captações abandonadas, e caso o nível piezométrico desça ao ponto de favorecer o movimento descendente da água subterrânea (Figura 10), estas discontinuidades funcionam como locais de entrada de poluentes no aquífero. A análise da diferença entre os níveis piezométrico e freático assume assim um papel auxiliar na avaliação do risco de poluição em aquíferos confinados. As áreas mais sujeitas à entrada de poluentes são aquelas onde o nível piezométrico ocupa uma posição mais baixa que o nível freático.



Fonte: Adaptado de Everett, (1987)

Figura 10- Fluxo descendente na camada confinante em consequência da descida do nível piezométrico

Quanto menor for a permeabilidade da unidade confinante do aquífero, menor é a probabilidade de este ser alcançado por poluentes. Quando a unidade confinante apresenta permeabilidade moderada, pode permitir que ocorra recarga lenta do aquífero em situações em que o fluxo de água é descendente em consequência de extracções ou outros factores (Figura 11). Estes são na realidade aquíferos semi-confinados e em termos de protecção a situação é em tudo semelhante à do aquífero confinado com discontinuidades. Os poluentes podem alcançar o aquífero não só em áreas de recarga distantes mas também junto da captação (EPA,1993).



Fonte: Adaptado de Everett, (1987)

Figura 11 - Fluxo descendente em camada confinante de permeabilidade moderada

Outra situação que ocorre com alguma frequência e que conduz à poluição dos aquíferos confinados, é o caso de furos abandonados, ou mal construídos, que atravessam mais que um aquífero colocando-os em contacto e aumentando o risco de poluição.

4.4. Avaliação da Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas à Poluição

O conhecimento da vulnerabilidade à poluição de uma determinada região desempenha crucial importância na definição de estratégias relacionadas com a definição de perímetros de protecção. Na presença de um mapeamento de vulnerabilidade é possível decidir quais os aquíferos em que se devem concentrar esforços numa primeira fase deixando as zonas menos vulneráveis para fases posteriores (Moinante 2002).

De acordo com o anteriormente referido, um aquífero poderá apresentar um alto índice de vulnerabilidade, mas sem risco de poluição na ausência de descarga poluente, ou apresentar um risco de poluição excepcional apesar de apresentar uma baixa vulnerabilidade.

É importante reconhecer que a vulnerabilidade de um aquífero depende também do tipo de potenciais poluentes. A qualidade da água pode ser muito vulnerável a uma carga de nitratos, originada por práticas agrícolas incorrectas, e no entanto ser pouco vulnerável a cargas patogénicas (devido à mortalidade natural dos agentes patogénicos). Tendo em consideração o exposto, é importante avaliar a vulnerabilidade à poluição tendo em conta tipos específicos de poluição criando o conceito de vulnerabilidade específica (Lobo Ferreira et al., 1991) .

São vários os métodos de avaliação da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas. Entre estes merece particular destaque os métodos AVI, GOD, EPPNA e DRASTIC.

No estudo que a seguir se apresenta, definição dos Perímetros de Protecção das minas Eirinhas, a respectiva vulnerabilidade será avaliada pelo índice DRASTIC, pelo que se faz em seguida uma descrição deste método.

A vulnerabilidade é uma medida, relativa, do potencial à poluição, da área em estudo, e varia entre 23 e 230, aumentando a vulnerabilidade do aquífero com o valor respectivo do índice DRASTIC (Tabela 1).

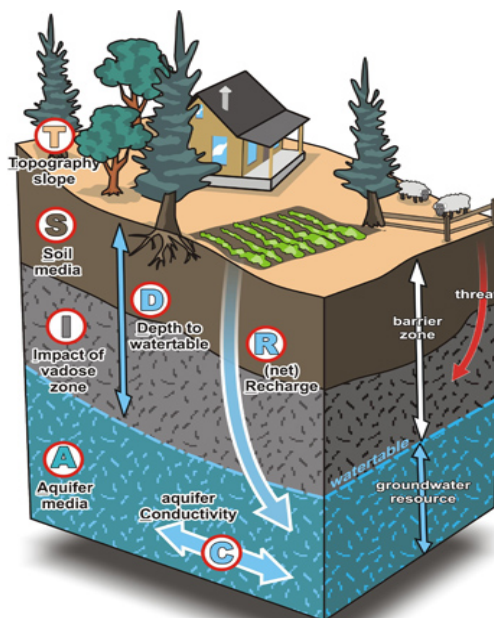
Tabela 1 - Classificação qualitativa da vulnerabilidade em função do índice DRASTIC

Índice DRASTIC	Vulnerabilidade
180 – 230	Muito alta
150 – 179	Alta
120 – 149	Intermediária
23 – 119	Baixa

O método DRASTIC de avaliação da vulnerabilidade à poluição foi proposto por Aller et al. (1987).

O índice de vulnerabilidade DRASTIC corresponde ao somatório ponderado dos valores atribuídos aos 7 parâmetros seguintes (Figura 12):

- D - Profundidade do topo do aquífero (Depth to Water)
- R - Recarga do aquífero (Net Recharge)
- A - Material do Aquífero (Aquifer Media)
- S - Tipo de Solo (Soil Media)
- T - Topografia (Topography)
- I - Influência da Zona Não Saturada (Impact of the Vadose Zone Media)
- C - Condutividade Hidráulica do Aquífero (Hydraulic Conductivity of the Aquifer)



Fonte: Greater Oliver Groundwater Vulnerability, (2011)

Figura 12 - Método DRASTIC

É importante referir que a utilização do DRASTIC assume que (Aller et al., 1987):

- O poluente é introduzido à superfície
- O poluente é transportado verticalmente até ao aquífero pela água de infiltração
- O poluente tem mobilidade igual à da água
- A área avaliada é superior a 0,4 km²

Cada um dos parâmetros DRASTIC foi dividido em escalões . A cada um dos escalões foi atribuído um índice entre 1 e 10 (excepto o caso do parâmetro R: índice que varia entre 1 e 9) e que corresponde a uma determinada vulnerabilidade à poluição.

- **Parâmetro D** = Profundidade do topo do aquífero

Determina a distância que um contaminante tem de percorrer até chegar à zona saturada (Tabela 2). Geralmente, existe maior probabilidade de um contaminante sofrer atenuação quanto maior for a profundidade.

Tabela 2 - Profundidade do topo do aquífero

Profundidade (m)	< 1,5	1,5-4,6	4,6-9,1	9,1-15,2	15,2-22,9	22,9-30,5	>30,5
Índice	10	9	7	5	3	2	1

- **Parâmetro R** = Recarga do aquífero

Quantidade de água que atinge a zona saturada (Tabela 3). Este parâmetro condiciona o transporte dos poluentes. De uma forma geral, quanto maior for a recarga maior o potencial de poluição associado.

Tabela 3 - Recarga do aquífero

Recarga (mm/ano)	< 51	51 -102	102 -178	178 -254	>254
Índice	1	3	6	8	9

- **Parâmetro A** = Material do Aquífero

Este parâmetro refere-se à capacidade de atenuação do aquífero que é função do material que o constitui (Tabela 4).

Tabela 4 - Material do Aquífero

Material do aquífero	Índice	Índice típico
Xisto argiloso, argilito	1-3	2
Rocha metamórfica / ígnea	2-5	3
Rocha metamórfica / ígnea alterada	3-5	4
“Till” glacial	4-6	5
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

- **Parâmetro S = Tipo de solo**

Corresponde às características da zona não saturada, sendo caracterizada por uma intensa actividade biológica (Tabela 5). Em função da sua estrutura, pode restringir a migração dos contaminantes. Os factores mais importantes na definição do poder de atenuação do solo são a percentagem de argilas que o constituem, o tamanho dos grãos e a quantidade de matéria orgânica.

Tabela 5 - Tipo de solo

Solo	Índice
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

- **Parâmetro T = Topografia**

Refere-se ao declive ou inclinação da zona, correspondendo a zonas muito declivosas situações onde os poluentes vão ser evacuados pelo escoamento superficial, e zonas planas em que os contaminantes vão ser arrastados pelas águas de percolação até à zona saturada (Tabela 6).

Tabela 6 - Topografia

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

- **Parâmetro I** = Influência da zona não saturada

Está relacionado com o tipo de material da zona acima do nível freático que determina o tempo de percurso do poluente, permitindo a ocorrência de diversos processos de atenuação: biodegradação, neutralização, filtração mecânica, reacção química, volatilização e dispersão (Tabela 7).

Tabela 7 - Influência da zona não saturada

Zona não saturada	Índice	Índice típico
Camada confinante	1	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 percentagem 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

- **Parâmetro C** = Condutividade hidráulica do aquífero

Refere-se à capacidade do aquífero para transmitir água, em maior ou menor vazão, por unidade de área (Tabela 8).

Tabela 8 - Condutividade hidráulica do aquífero

Condutividade hidráulica (m/d)	Índice
< 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

O índice de vulnerabilidade DRASTIC calcula-se pela aplicação da seguinte expressão (Aller et al., 1987):

$$DRASTIC = D_p \times D_i + R_p \times R_i + A_p \times A_i + S_p \times S_i + T_p \times T_i + I_p \times I_i + C_p \times C_i$$

Deve ser considerado i como o valor atribuído ao parâmetro a estimar em função das condições locais, e p o seu peso relativo, atribuído ao parâmetro de acordo com a importância que assume na definição da vulnerabilidade. Os parâmetros mais importantes têm um peso 5, os menos importantes um peso 1. Existem duas atribuições de pesos relativos, ou factores de ponderação, uma para aplicação geral do DRASTIC e outra, específica para a contaminação com pesticidas, como se pode observar na Tabela 9.

Tabela 9 - Factores de ponderação do método DRASTIC

	DRASTIC normal	DRASTIC pesticidas
Profundidade do topo do aquífero	5	5
Recarga do aquífero	4	4
Material do aquífero	3	3
Tipo de solo	2	5
Topografia	1	3
Influência da zona não-saturada	5	4
Condutividade hidráulica do aquífero	3	2

5. Critérios e Metodologias na delimitação de Perímetros de Protecção em captações de águas subterrâneas

5.1. Critérios de delimitação dos Perímetros de Protecção

Para a delimitação de um perímetro de protecção deve decidir-se previamente quais os critérios que lhe vão servir de base, uma vez que os objectivos que se pretendem alcançar variam em função da escolha destes.

Destacam-se alguns critérios para a delimitação de um perímetro de protecção segundo MOINANTE E FERREIRA (2004):

- **Distância:** Baseia-se na delimitação simples de uma área definida por um círculo cujo centro é ocupado pela própria captação. É o critério mais simples e mais rápido, não incorpora o fluxo da água subterrânea nem os processos relacionados com o transporte do poluente, podendo resultar numa protecção insuficiente ou ineficaz.

- **Rebaixamento:** O rebaixamento ocorre quando a água de um aquífero é removida por extracção. É o termo aplicado à descida do nível piezométrico na vizinhança da captação, criando um gradiente que conduz a água até ao ponto de descarga. Este critério define o rebaixamento ou área de influência. Considera as alterações que ocorrem na direcção do fluxo e o aumento da velocidade de chegada da água à captação, devido à extracção de água, o que poderá originar ou acelerar a propagação do poluente em direcção à captação.

Pode ocorrer a protecção inadequada da captação pois a zona de influência não inclui a parte montante da zona de contribuição.

- **Tempo de propagação:** O tempo de propagação, traduz o tempo que a água subterrânea e/ou um poluente gasta para atingir a captação, partindo de um ponto no interior da zona de contribuição. Com base neste critério são definidas isócronas (linhas de igual tempo) referentes a períodos de tempo seleccionados, a área contida numa isócrona pode ser referida como zona de transporte e ser utilizada como zona de protecção.

Trata-se de um dos critérios mais precisos, considera factores do processo de propagação do poluente (advecção, dispersão e interacção sólido-líquido).

- **Critérios hidrológicos/Fronteiras de fluxo:** Estes critérios baseiam-se na definição da área geográfica, que contribui com água subterrânea para a captação, com base nas divisórias hidrogeológicas e/ou em outras entidades físicas e hidrogeológicas, controladoras do fluxo de água subterrânea. Esta área geográfica corresponde à zona de contribuição da captação e poderá ser utilizada como zona de protecção.

Estes critérios são úteis na fase inicial do perímetro de protecção, uma vez que conduzem normalmente a áreas sobredimensionadas. Deverão, no entanto, ser sempre utilizados em conjunto com outros critérios, de modo a restringir ou a modificar os seus resultados (ex. aquíferos fracturados).

- **Poder autodepurador do terreno/Captação de assimilação:** Este critério considera a capacidade que a secção saturada e/ou não saturada que o aquífero tem, para imobilizar ou atenuar a concentração dos poluentes que o atravessam, antes de alcançarem a captação. Essa

atenuação é possível através de processos como a diluição, dispersão, absorção-adsorção, precipitação química ou degradação biológica, que actuam de modo diferente para cada poluente. Torna-se assim possível a determinação da extensão de terreno que o poluente tem que atravessar, até alcançar concentrações aceitáveis para o consumo humano.

A aplicação deste critério exige conhecimento sobre modelos de transporte de poluentes e informação sobre a hidrologia, hidrogeologia, geologia e geoquímica da área em causa.

A Tabela 10 relaciona os critérios existentes com o processo físico que controlam (ITGE,1991):

Tabela 10- Critérios e processos físicos que estes controlam

Processo Físico	Distância	Rebaixamento	Tempo de Propagação	Critérios Hidrogeológicos	Poder autodepurador do terreno
Advecção		X	X	X	
Dispersão hidrodinâmica (dispersão mecânica e difusão molecular)			X		X
Interação sólido-soluto (reações químicas de adsorção)			X		X

Fonte : Adaptado de ITGE (1991)

5.2. Selecção do critério a aplicar

As considerações técnicas envolvem diversos factores, cuja importância depende dos objectivos que se pretendem alcançar com o traçado do Perímetro de Protecção, bem como com as características hidrogeológicas da captação em estudo.

Estes factores são os seguintes (ITGE, 1991; EPA, 1987):

- **Facilidade de aplicação** - indica a necessidade de capacidade técnica maior ou menor.
- **Facilidade de quantificar** - levanta a possibilidade de utilizar métodos matemáticos na sua aplicação.
- **Adaptabilidade a alterações** - consiste em avaliar a possibilidade de adaptação do método a possíveis modificações que se venham a verificar no futuro, como por exemplo variações nos caudais de extracção.
- **Facilidade de verificação** - reflecte a facilidade com que os resultados obtidos podem, ou não, ser reproduzidos no terreno e ser confirmados através de testes *in situ*.
- **Capacidade de considerar o efeito autodepurador do terreno** - Trata-se de avaliar com que fiabilidade são reflectidas as características intrínsecas do terreno.

- **Concordância com o modelo hidrogeológico escolhido** - a capacidade de aplicação de um critério a um determinado conjunto de características hidrogeológicas é um factor de avaliação essencial; os controladores físicos que podem influenciar a facilidade de aplicação do critério são a localização das fronteiras do aquífero, a extensão do confinamento do aquífero, o grau de consolidação do aquífero, o grau de fracturação do aquífero e a extensão do desenvolvimento de canais.
- **Capacidade de considerar processos físicos** - reflecte a capacidade do critério escolhido para incorporar os processos físicos envolvidos.

Para além dos factores citados, o traçado do Perímetro de Protecção parte de objectivos de protecção que dependem intrinsecamente dos critérios seleccionados na modelação do problema.

Os objectivos usualmente propostos são os apresentados na Tabela 11 (ITGE, 1991):

Tabela 11 - Relação entre objectivos e critérios no traçado de perímetros de protecção

OBJECTIVOS	CRITÉRIOS
<ul style="list-style-type: none">• Evitar que devido à extracção de água, se produzam nas imediações da captação variações no fluxo que possam provocar a chegada de substâncias indesejáveis à mesma.	Distância Rebaixamento
<ul style="list-style-type: none">• Assegurar que a contaminação seja imobilizada ou atenuada para concentrações aceitáveis no trajecto entre o ponto de despejo e a captação.	Poder Autodepurador do terreno Tempo de propagação Distância
<ul style="list-style-type: none">• Proporcionar um tempo de reacção que permita recorrer a fontes alternativas de abastecimento, até que o efeito da contaminação se reduza para níveis toleráveis.	Tempo de propagação
<ul style="list-style-type: none">• Garantir a qualidade das águas subterrâneas em toda a área de contribuição da captação.	Critérios hidrogeológicos

Por fim, também as considerações de carácter político devem ser tidas em conta na selecção dos critérios. As considerações políticas podem ser as seguintes (EPA, 1987):

- **Facilidade de compreensão** - a facilidade de compreensão do critério por parte do público em geral. É um factor importante que pode por em causa a aplicabilidade das medidas proteccionistas.
- **Economia do desenvolvimento do critério** - os custos da aplicação de um critério e dos recursos técnicos envolvidos na sua aplicação, são decisivos para impedir ou encorajar a sua utilização, normalmente critérios mais complexos que necessitam de informação muito detalhada ou que envolvam um trabalho mais intensivo, tornam-se mais dispendiosos, desencorajando a sua utilização, ainda que a sua validade técnica seja inquestionável.

- **Defensabilidade** - as fronteiras de uma zona de protecção devem ser claramente definidas e defensáveis contra protestos por parte das entidades afectadas (alguns critérios suscitam mais discussão que outros).
- **Utilidade na implementação de faseamento** - algumas entidades preferem iniciar os programas de protecção aplicando o critério mais simples e menos dispendioso, avançando ulteriormente para critérios mais sofisticados (o critério da distância é, de um modo geral, escolhido na fase inicial).
- **Relevância do objectivo de protecção** - reflecte o grau com que o critério incorpora ou suporta o objectivo de protecção seleccionado.

5.3. Metodologias na delimitação de Perímetros de Protecção

Os métodos de delimitação de Perímetros de Protecção são diversos, a sua escolha dependerá do tipo de aquífero, do critério delimitador da informação e dos recursos disponíveis. A delimitação do perímetro de protecção deverá fundamentar-se em estudos que avaliem as características hidrogeológicas dos aquíferos, a vulnerabilidade à poluição das formações hidrogeológicas e o risco de poluição (MENDES, 2010).

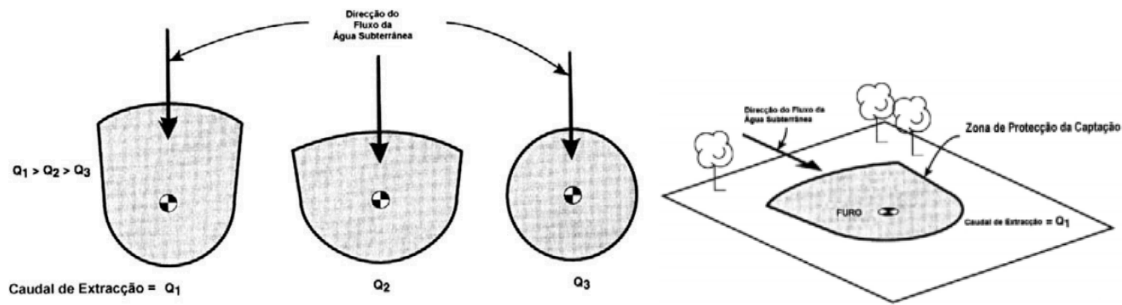
A escolha das metodologias a utilizar, na definição de um Perímetro de Protecção, varia com os custos de implementação e, ainda, da complexidade da aplicação. A adequação do modelo de cálculo à realidade aumenta com a complexidade do método utilizado, mas aumenta também o custo e o nível de experiência e informação exigidos. No entanto, tem que se considerar que os custos associados a um programa de protecção de água subterrânea, são largamente ultrapassados pelos custos e dificuldades envolvidas na reabilitação, ou mesmo com a perda, de um aquífero por poluição.

São enumerados de seguida alguns métodos existentes para a delimitação de perímetros de protecção dando-se especial ênfase aos métodos utilizados no presente estudo - captações Eirinhas - Raio Fixo Calculado e Wyssling.

5.3.1. Métodos Geométricos

5.3.1.1. Formas variáveis simplificadas

Permitem a obtenção de formas simplificadas de Perímetros de Protecção (Figura 13), aplicando-se os critérios de fronteira de fluxo e tempo de propagação. Este método consiste em escolher a forma, de entre as representadas num catálogo de formas de Perímetros de Protecção, a aplicar, utilizando parâmetros hidrogeológicos similares aos existentes no caso em estudo. Uma vez seleccionada a forma, resta orientá-la na captação, em função da direcção e sentido do fluxo subterrâneo (ITGE, 1991).



Fonte: Adaptado de EPA, (1993)

Figura 13 - Definição do perímetro de protecção utilizando o método das formas variáveis simplificadas

Apresenta como grande vantagem o facto de uma vez criado o catálogo para determinados parâmetros hidrogeológicos se aplicar facilmente com custos de implementação reduzidos uma vez que só necessita informação sobre: caudal de extracção, tipo de material e direcção do fluxo de água subterrânea. É de salientar, no entanto, que na presença de limites hidrogeológicos, heterogeneidades do aquífero e outros factores, que não tenham sido considerados na elaboração do catálogo de formas, a sua eficácia diminui notoriamente, podendo resultar numa protecção ineficaz.

5.3.2. Métodos analíticos

Os métodos analíticos permitem calcular as dimensões das zonas de protecção, recorrendo a equações de simples resolução, utilizando alguns parâmetros hidrogeológicos, tais como: transmissividade, porosidade, gradiente hidráulico, condutividade hidráulica, caudal de extracção e espessura saturada do aquífero. Estes métodos baseiam-se em cálculos utilizando o critério do tempo de propagação ou rebaixamento, não considerando nem as fronteiras hidrogeológicas (rios, lagos, canais), recarga, nem as heterogeneidades do próprio aquífero.

Outro inconveniente é o facto de não ser possível calibrar e validar o modelo, ou seja, não é possível testar se as suposições assumidas reflectem, ou não, o sistema.

5.3.2.1. Raio Fixo Calculado

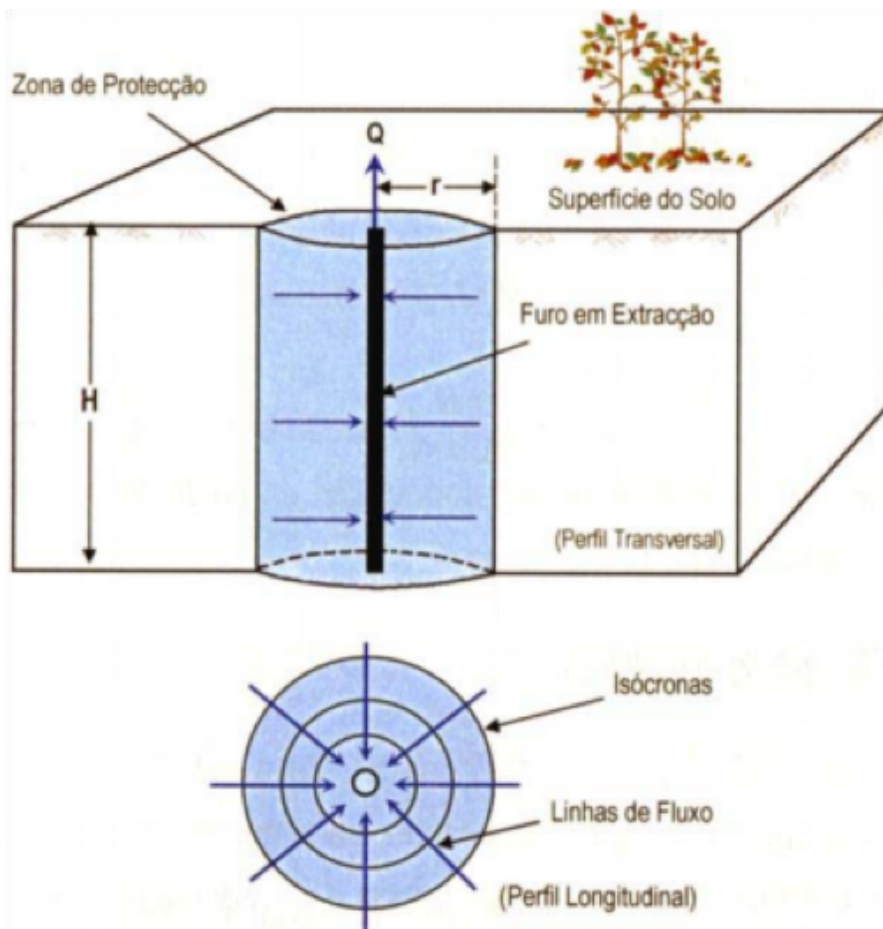
Consiste num método relativamente simples, pouco dispendioso e que exige pouca experiência especializada. Calcula o raio de uma secção cilíndrica do aquífero, centrada na captação, e com capacidade para conter o volume da água captada durante um determinado tempo de propagação, tempo esse necessário para que um potencial poluente seja minimizado até apresentar concentrações seguras antes de alcançar a captação.

Este método considera, que a superfície piezométrica inicial é horizontal, a captação é a única a drenar do aquífero com caudal constante e que não existem direcções preferenciais de fluxo, com todas as linhas de corrente a convergir para a captação (Figura 14).

O único parâmetro hidrogeológico aplicado segundo a equação volumétrica (1) é a porosidade eficaz cujos valores se apresentam na Tabela 13.

$$Q \cdot t = n \cdot \pi \cdot H \cdot r^2 \Leftrightarrow r = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{n \cdot H \cdot \pi}} \quad (1)$$

- Q - caudal de exploração da captação (m^3/d)
- t - tempo de propagação (d)
- n - porosidade eficaz do aquífero
- H - espessura saturada na captação (m)
- r - raio do perímetro de protecção (m)



Fonte: Adaptado de EPA (1993)

Figura 14 - Definição de perímetro de protecção utilizando o método do raio fixo calculado

O Decreto-Lei n.º 382/99 de 22 de Setembro, estabelece valores para o raio do perímetro de protecção da captação, obtido da equação (1), dependendo do tipo de sistema aquífero (Tabela 12).

Tabela 12 - Relação entre o raio dos perímetros de protecção com os tipos de aquíferos

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 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).

$$r_1(t) = \sqrt{\frac{Q \times t}{3,14 \times n \times H}}$$

em que:

- $r_1(t)$ — 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.

Fonte: Adaptado do Decreto-Lei 382/99 de 22 de Setembro

Tabela 13 - Valores da 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.

Fonte: Adaptado do Decreto-Lei 382/99 de 22 de Setembro

Este método pode igualmente ser calculado utilizando o rebaixamento do nível piezométrico em alternativa ao tempo de propagação.

Neste caso a área definida é aquela na qual é produzido um determinado rebaixamento do nível piezométrico do aquífero e a equação utilizada é a Equação de Theis (2) para regime variável (ITGE, 1991):

$$d = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} \cdot du \quad (2)$$

em que u é uma função auxiliar (3) com o seguinte valor:

$$u = \frac{R^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t} \quad (3)$$

- d - rebaixamento em um ponto a uma distância R da captação (m)
- Q - caudal de extracção constante (m³/d)
- T - transmissividade do aquífero (m²/d)
- S - coeficiente de armazenamento ou cedência específica do aquífero¹²
- t - tempo decorrido desde o início da extracção (d)
- R - distância à captação

Define-se então a equação (4), uma função de poço $W(u)$ que por não ter solução analítica, foi resolvida por métodos aproximados, resultando a Tabela 14 de Função de Poço $W(u)$ e u .

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} \cdot du = -0,577216 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 * 2!} + \frac{u^3}{3 * 3!} - \frac{u^4}{4 * 4!} + \dots \quad (4)$$

Tabela 14 - Função de Poço W(u)

	$k \times 10^{-14}$	$k \times 10^{-12}$	$k \times 10^{-10}$	$k \times 10^{-8}$	$k \times 10^{-6}$	$k \times 10^{-4}$	$k \times 10^{-2}$	k
1,0	31.6590	27.0538	22.4486	17.8435	13.2383	8.6332	4.0379	0,2194
1,5	31,2535	26,6483	22,0432	17,4380	12,8328	8,2278	3,6374	,1000
2,0	30,9658	26,3607	21,7555	17,1503	12,5451	7,9402	3,3547	,04890
2,5	30,7427	26,1375	21,5323	16,9272	12,3220	7,7172	3,1365	,02491
3,0	30,5604	25,9552	21,3500	16,7449	12,1397	7,5348	2,9591	,01305
3,5	30,4062	25,8010	21,1959	16,5907	11,9855	7,3807	2,8099	,006970
4,0	30,2727	25,6675	21,0623	16,4572	11,8520	7,2472	2,6813	,003779
4,5	30,1549	25,5497	20,9446	16,3394	11,7342	7,1295	2,5684	,002073
5,0	30,0495	25,4444	20,8392	16,2340	11,6289	7,0242	2,4679	,001148
5,5	29,9542	25,3491	20,7439	16,1387	11,5336	6,9289	2,3775	,0006409
6,0	29,8672	25,2620	20,6569	16,0517	11,4465	6,8420	2,2953	0,0003601
6,5	29,7872	25,1820	20,5768	15,9717	11,3665	6,7620	2,2201	,0002034
7,0	29,7131	25,1079	20,5027	15,8976	11,2924	6,6879	2,1508	,0001155
7,5	29,6441	25,0389	20,4337	15,8286	11,2234	6,6190	2,0867	,00006583
8,0	29,5795	24,9744	20,3692	15,7640	11,1589	6,5545	2,0269	,00003767
8,5	29,5189	24,9137	20,3086	15,7034	11,0982	6,4939	1,9711	,00002162
9,0	29,4618	24,8566	20,2514	15,6462	11,0411	6,4368	1,9187	,00001245
9,5	29,4077	24,8025	20,1973	15,5922	10,9870	6,3828	1,8695	0,000007185

Fonte: Villanueva, M. e Iglesias, A.,(1984)

¹² Parâmetro hidrogeológico adimensional que corresponde ao 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.

A maneira de proceder consiste em calcular $W(u)$ e obter da tabela de função de poço o valor u da função auxiliar.

Para o valor de $W(u)$ calculado através da equação (5), escolhe-se na Tabela 14 a coluna com valor de K mais aproximado. Para o valor escolhido é devolvido na mesma linha na primeira coluna da tabela o valor da função auxiliar u .

$$d = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \quad w(u) \rightarrow W(u) = \frac{d \cdot 4 \cdot \pi \cdot T}{Q} \quad (5)$$

Finalmente substitui-se o seu valor na equação (6) obtendo-se a distância à captação (R) em que se produz o rebaixamento (d) fixado como critério para delimitar o perímetro de protecção.

$$u = \frac{R^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t} \rightarrow R = \sqrt{\frac{u \cdot 4 \cdot T \cdot t}{S}} \quad (6)$$

O método do raio fixo calculado é mais adequado para aquíferos verdadeiramente confinados, sem drenância vertical a partir do estrato confinante superior. Não se revela apropriado para aquíferos de carácter livre, visto que o cone de rebaixamento gerado não é cilíndrico e além disso a recarga não é considerada. É também necessário que o gradiente hidráulico seja mínimo ($<0,0005$ ou $0,001$), uma vez que gradientes muito abruptos geram zonas de influência não circulares (EPA, 1994).

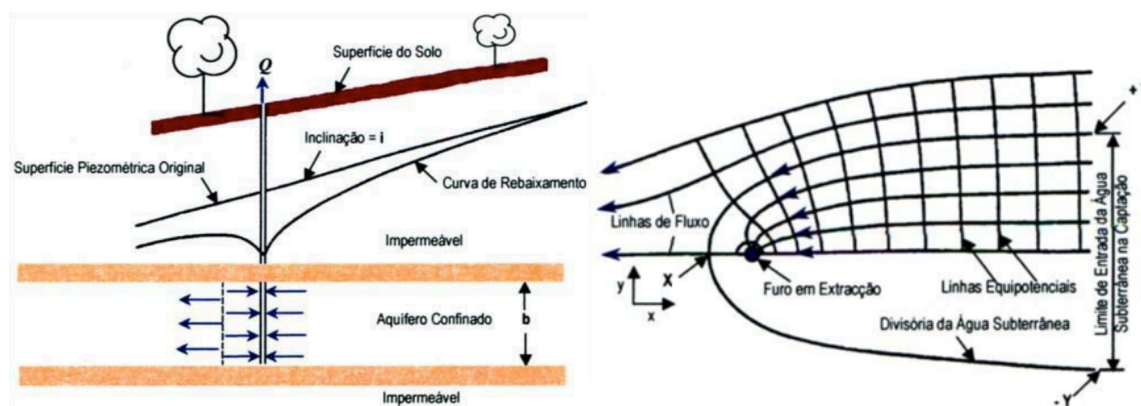
Em resumo, pode inferir-se que resultados obtidos pelo método do raio fixo calculado, aproximam-se tanto mais da realidade quanto mais se assemelhem os parâmetros físicos do caso estudado, das condições matemáticas impostas no modelo de cálculo. Essas condições são as seguintes (ITGE, 1991):

- ausência de recargas anteriores;
- o aquífero é homogéneo e isotrópico relativamente à sua permeabilidade;
- o aquífero é infinito na sua extensão;
- a captação tem diâmetro igual a zero;
- a captação atravessa completamente a formação aquífera;
- a água captada é descarregada instantaneamente e não volta a entrar no aquífero;
- o fluxo de água é radial em torno da captação e não existem componentes verticais;
- a superfície piezométrica regional é praticamente plana;
- o caudal de extracção é constante.

5.3.2.2. Equação de Fluxo Uniforme

Na definição de Perímetros de Protecção tem sido muito utilizada a equação de Fluxo Uniforme.

Na verdade a ocorrência de uma superfície piezométrica inclinada (Figura 15) gera um cone de rebaixamento assimétrico (EPA, 1994), aplicando-se a equação de fluxo uniforme em aquíferos muito confinados não considerando o fluxo através da camada confinante (drenância).



Fonte: Adaptado de EPA (1993)

Figura 15 - Perímetro de protecção utilizando a equação de fluxo uniforme

Pode também ser aplicada em aquíferos livres, utilizando a espessura saturada do aquífero e considerando que o rebaixamento é inferior a 10%, relativamente à espessura saturada. A equação geral (7), para a determinação da fronteira da região que produz entrada de fluxo, numa captação em extração, é a seguinte (Todd, 1980):

$$-\frac{Y}{X} = \tan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot b \cdot i}{Q} \cdot Y\right) \quad (7)$$

{

- x, y - coordenadas
- Q - caudal de exploração da captação (m^3/d)
- k - condutividade hidráulica (m/d)
- b - espessura saturada (m)
- i - gradiente hidráulico

A definição da zona de contribuição baseia-se nas equações (8) derivadas da equação anterior, e que representam, respectivamente, a fronteira de fluxo, a jusante, e a largura máxima da zona de contribuição, a montante. A fronteira de fluxo a jusante é definida pelo ponto onde não existe movimento da água subterrânea.

$$X = -\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot b \cdot i} \quad e \quad Y = \pm \frac{Q}{2 \cdot k \cdot b \cdot i} \quad (8)$$

5.3.2.3. Método de Wyssling

Wyssling (ITGE, 1991) desenhou um método para optimização do Perímetro de Protecção que consiste no cálculo da zona de chamada¹³ de uma captação, admitindo aquíferos porosos homogéneos e procura posterior do tempo de propagação desejado.

O cálculo da zona de chamada utiliza a equação de fluxo uniforme, referida anteriormente, que considera captações em extracção e superfícies piezométricas inclinadas.

É um método que apresenta, comparativamente ao do raio fixo calculado, medidas mais proteccionistas a montante que a jusante da captação, o que se torna interessante pois coincide com a zona preferencial de recarga, mas apresenta como desvantagem o facto de não ter em conta as heterogeneidades do aquífero.

Se B for a largura da frente da zona de chamada (Figura 16), num aquífero livre,

$$B = \frac{Q}{K \cdot b \cdot i} \quad (9)$$

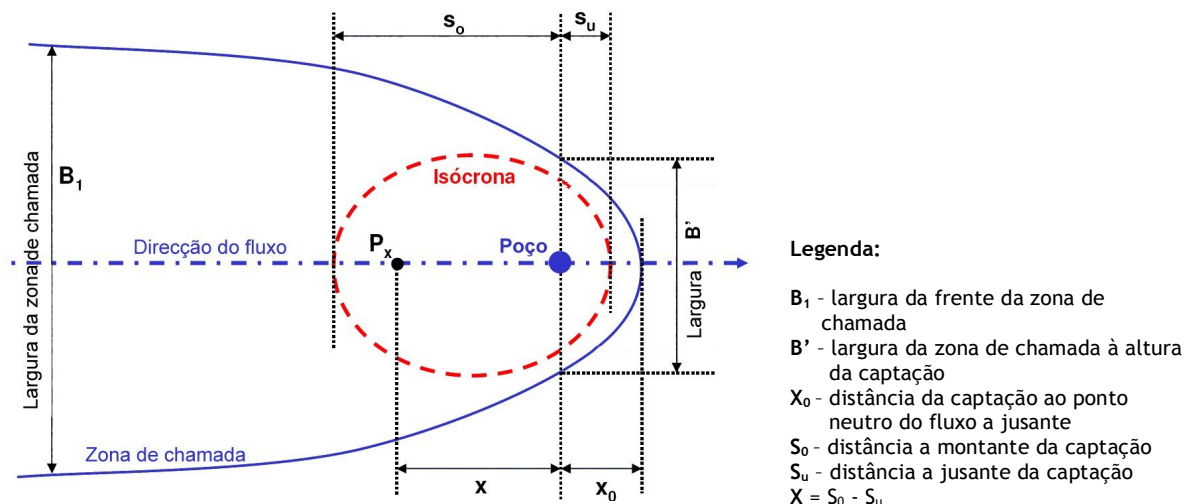
Q - caudal de exploração (m³/d)
K - condutividade hidráulica (m/d)
b - espessura saturada do aquífero (m)
i - gradiente hidráulico

a distância da captação ao ponto neutro a jusante, obtem-se do seguinte modo,

$$X_0 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i} \quad (10)$$

e a largura B' da zona de chamada, medida na perpendicular à direcção do fluxo que passa na captação, é:

$$B' = \frac{B}{2} \quad (11)$$



Fonte: Adaptado de ITGE, (1991)
Figura 16 - Método de Wyssling

¹³ Entende-se como “zona de chamada” a zona do aquífero na qual ocorre rebaixamento piezométrico e onde as linhas de fluxo se dirigem para a captação

Após a definição da zona de chamada é necessário determinar para o tempo de propagação pretendido na direcção do fluxo, os seguintes parâmetros:

- Velocidade eficaz:

$$v_e = \frac{K \cdot i}{n} \quad (12)$$

v_e - velocidade eficaz (m/d)
 n - porosidade eficaz

- l para o tempo de propagação pretendido:

$$l = v_e \cdot t \quad (13)$$

t - tempo de propagação (d)

- Distância a montante da captação
 (na direcção do fluxo)

$$S_0 = \frac{+l + \sqrt{l \cdot (l + 8 \cdot X_0)}}{2} \quad (14)$$

- Distância a jusante da captação
 (na direcção do fluxo)

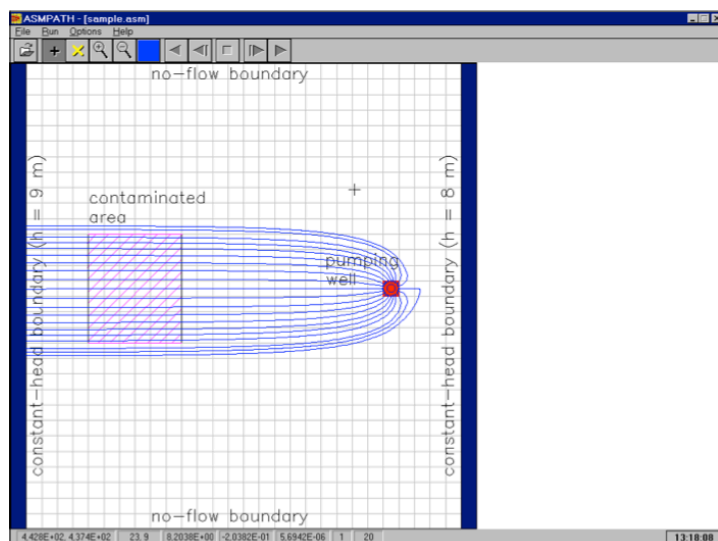
$$S_u = \frac{-l + \sqrt{l \cdot (l + 8 \cdot X_0)}}{2} \quad (15)$$

5.3.3. Métodos Numéricos

No presente trabalho tentou-se, numa primeira abordagem, a aplicação de metodologias numéricas, visando a possibilidade de simular a dispersão de potenciais poluentes e, ainda, permitir uma discussão crítica e alargada entre os diferentes métodos utilizados no traçado de Perímetros de Protecção. O software utilizado foi o ASM-6.0 (Aquifer Simulation Model) tendo sido possível uma primeira calibração ainda que pouco satisfatória. A principal dificuldade prendeu-se com a ausência de informação fidedigna para alguns dos parâmetros de entrada.

Desta forma entendemos adiar a implementação destas metodologias para desenvolvimentos futuros deste trabalho pois, sem dúvida alguma, os modelos numéricos, sendo matematicamente mais complexos que os modelos analíticos, permitem solucionar problemas com condições de fronteira complexas e variações nas propriedades hidráulicas, que eventualmente possam ocorrer no sistema aquífero. Nestes modelos é estabelecida uma malha sobre o sistema a estudar, a cujos nós é atribuído um conjunto de valores de parâmetros (e.g. condutividade hidráulica, nível piezométrico, espessura do aquífero, porosidade, etc). Os pontos desta malha representam uma enorme matriz de equações, só possível de resolver recorrendo a técnicas computacionais.

Existem vários programas desenvolvidos que permitem a resolução destes sistemas recorrendo a modelos de diferenças finitas como é o caso do ASM-6.0 (Figura 17) ou a elementos finitos no caso do FEFLOW¹⁴.



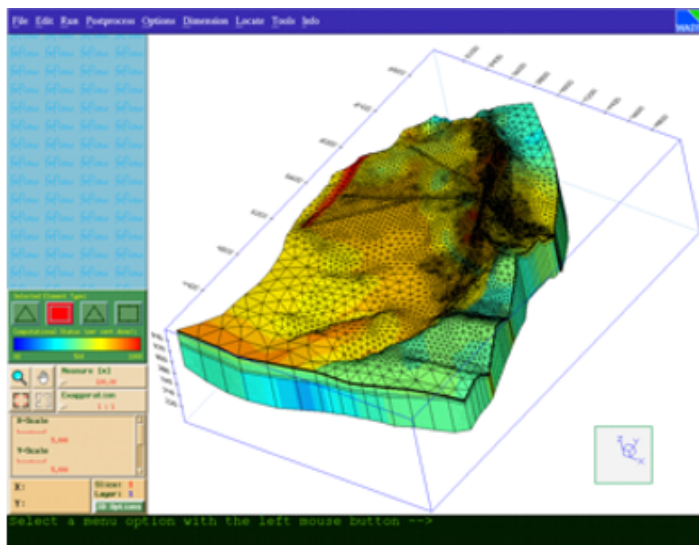
Fonte: Chiang, W. H., et al, (1998)

Figura 17 - Simulação da zona de contribuição em ASM-6.0

Nos modelos de diferenças finitas a geometria da malha pode ser rectangular ou quadrangular permitindo devolver valores médios nos pontos centrais da malha. Por sua vez, os modelos de elementos finitos permitem traçar uma malha geometricamente mais flexível

¹⁴ Software para modelagem do caudal de águas subterrâneas e dos processos de transporte de contaminantes.

admitindo elementos triangulares (Figura 18) que se adaptam à localização das singularidades estudadas no sistema de águas subterrâneas.



Fonte: Consorzio DHI Italia, (2011)

Figura 18 - Modelação em software de elementos finitos - FEFLOW

A concepção destes modelos requer a formulação de hipóteses, que permitam caracterizar o aquífero modelado e ao mesmo tempo ir ao encontro dos objectivos que se pretendem atingir, tornando-se vital conhecer a quantidade e qualidade dos dados disponíveis. A correcta selecção das condições de fronteira do aquífero é dos factores mais importantes na modelação, condicionando de forma inquestionável a resposta do modelo. Para que estes modelos possam constituir uma importante ferramenta de planeamento e gestão na definição de Perímetros de Protecção, é necessário que sejam calibrados e subseqüentemente validados. Na fase de calibração são escolhidos os parâmetros a avaliar, normalmente valores de piezometria ou fluxos de entrada e saída do aquífero. Os valores dos parâmetros a avaliar gerados pelo modelo numérico são então comparados com os valores observados, considerando-se o modelo calibrado quando as diferenças sejam aceitáveis. É de igual modo importante nesta fase proceder-se a uma análise de sensibilidade para a quantificação da incerteza, gerada no modelo pelas incertezas associadas às condições de fronteira e aos parâmetros hidráulicos utilizados. Esta análise consiste em modificar o valor de um único parâmetro hidráulico em simulações sequenciais, e observar as alterações produzidas no modelo. O último passo a considerar é a validação do modelo, onde é observado o impacto causado em consequência de uma perturbação (e.g., aumento das extracções). O novo padrão de comportamento do modelo é então comparado com o actual permitindo que sejam efectuadas alterações nos dados de entrada ou nas condições de fronteira de modo a haver ajuste entre dados previstos e os observados.

A utilização destes modelos requer uma grande quantidade de informação e a presença de técnicos especializados, o que torna a sua utilização muito dispendiosa e só justificável quando se necessita de uma grande exactidão de resultados, devido a problemas complexos que envolvam expropriações e indemnizações dispendiosas, sendo necessário a redução dos Perímetros de Protecção à área estritamente necessária (ITGE, 1991).

5.4. Selecção dos métodos a aplicar

A correcta eleição dos critérios de delimitação dos Perímetros de Protecção reveste-se de especial importância, uma vez que determinará, de forma substancial as características geométricas do Perímetro de Protecção ajustado. O recurso a mais de um método, na determinação de perímetros de protecção, revela vantagens, ao permitir a comparação dos resultados obtidos quando analisado um conjunto real de atributos.

O ITGE elaborou a Tabela 15 onde se apresentam os métodos, mais adoptados para o traçado de Perímetros de Protecção, de captações de águas subterrâneas.

Tabela 15 - Critério utilizado nos diferentes métodos de delimitação de perímetros de protecção

Método/Critério		Distância	Rebaixamento	Tempo de Transito	Critérios Hidrogeológicos	Poder Autodepurador	Meios	
							Porosos e assimiláveis	Cárcicos e fissurados (sentido estrito)
	Raio fixado arbitrariamente	***					***	***
Métodos analíticos propriamente ditos	Função			***			***	
	Raio Fixo						***	
	Função		***				***	***
	Rebaixamento						***	
	Hoffman y Lillch		***	***			***	
	Wysling		***	***			***	
	Catalogo de formas simples		***	***			***	
Métodos gráficos	Albinet		***				***	***
	Tempo de transito			***			***	
	Sauty y Tyeri			***			***	
	Jacobs y Bear			***			***	
	por abacos						***	
	Ábacos de V. W. Y V.D.			***			***	
	Ábaco de Pettyjon			***			***	
Métodos hidrogeológicos	Horsley		***		***		***	***
	Hidrológicos				***		***	***
Modelos matemáticos	Modelos de fluxo e transporte		***	***	***		***	***
Outros métodos e técnicas	Rehse					***	***	
	Bolsenkotter							***
complementares	Marcadores			***	***	***	***	***
	Datação com Tritio			***		***	***	***

Fonte: Adaptado de ITGE (1991)

Da observação das várias metodologias apresentadas podemos constatar que todas elas se aplicam a meios porosos ou equivalentes e, em contrapartida, só um reduzido número pode ser aplicado em aquíferos cársicos ou fissurados. Contudo, é importante salientar, que em muitas ocasiões, o padrão de comportamento destes aquíferos está mais próximo do padrão dos aquíferos porosos, aos quais se pode aplicar a lei de Darcy.

O caso agora em estudo, as captações das Eirinhas, corresponde a um caso de controle hidrogeológico em meio fracturado. Nesta situação podem existir semelhanças com os aquíferos cársicos, apresentado um fluxo por condutas. No entanto, o fluxo não atinge velocidades tão elevadas, uma vez que a ausência de dissolução não facilita o alargamento das fracturas. A capacidade de armazenamento deste tipo de aquíferos, nos espaços vazios, é mais baixa que a apresentada pelos aquíferos porosos granulares.

Podem, no entanto, ser abordados os aquíferos fracturados como meios porosos se:

- a densidade de fracturação for elevada,

- a orientação das fracturas não for uniforme, havendo intersecção das mesmas,
- a abertura das fracturas seja uniforme e fina,
- o volume do aquífero considerado seja grande.

Do mesmo modo que a escolha dos critérios, a escolha dos métodos envolve também considerações de carácter técnico e económico, assim como a avaliação do impacto social que a implantação de um Perímetro de Protecção implica (ITGE, 1991).

O aspecto económico assume grande importância na selecção do método a aplicar, principalmente quando o número de captações a estudar numa região é muito grande. Uma abordagem comum nestes casos é, em primeira instância, aplicar métodos mais simples e económicos em todas as captações, para posteriormente, com base nos resultados obtidos, aplicar métodos mais precisos e eventualmente mais dispendiosos.

As condicionantes socioeconómicas desempenham, desta forma, um importante papel na escolha dos métodos de determinação dos Perímetros de Protecção. Os custos associados podem dividir-se em dois grandes grupos (ITGE, 1991):

- **Custos directos**

São custos de aplicação do Perímetro de Protecção, que englobam as obras e instalações na captação, o acondicionamento da zona de protecção imediata, a instalação de equipamentos de monitorização e controlo e, outros que se achem pertinentes directamente ligados com a exploração da captação.

- **Custos variáveis**

Custos que derivam das restrições impostas às actividades socioeconómicas no interior das zonas definidas pelo Perímetro de Protecção, previamente adoptado. Estes atingem por vezes valores muito elevados uma vez que podem envolver:

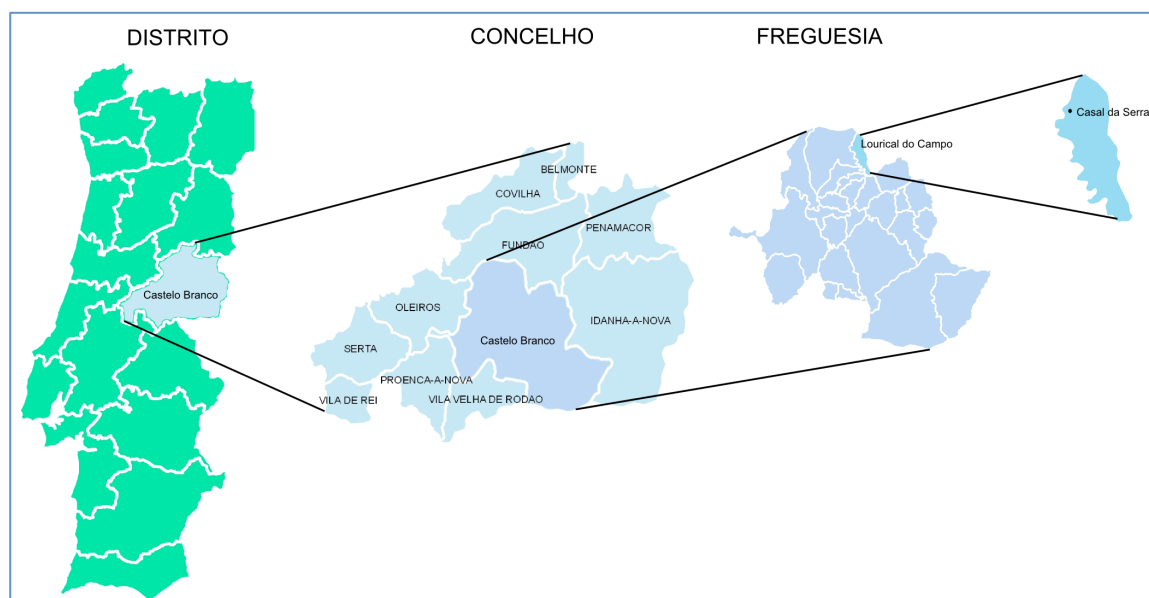
- Alteração do uso do solo
- Expropriações e indemnizações
- Alteração de obras civis
- Alteração ou deslocação de actividades potencialmente contaminantes (industriais, agrícolas, bovinos, etc.)

Posto isto, quando se chega à conclusão que os custos totais com a implementação do perímetro de protecção são muito elevados, poderá ser necessário avaliar se a utilização de um outro método, preferencialmente mais exacto e, desta forma, permitindo uma redução das áreas se, eventualmente, sobredimensionadas. Esta hipótese, supõe que o incremento no custo da definição do perímetro, seja compensado com a área de expropriação a reduzir. Outras soluções podem ser encontradas, como sejam a deslocação da captação para outro local do aquífero, ou a diminuição do caudal extraído reforçando o abastecimento com outra fonte alternativa.

6. Aplicação de Métodos Analíticos na Delimitação de Perímetros de Protecção para as Captações das Eirinhas - Distrito de Castelo Branco

6.1. Enquadramento geográfico

A aldeia de Casal da Serra enquadra-se na sub-região da Beira Interior Sul (NUT II), pertence ao Distrito e Concelho de Castelo Branco e é freguesia do Louriçal do Campo (Mapa 1). A freguesia de Louriçal do campo é delimitada pelas freguesias de São Vicente da Beira, Póvoa de Rio de Moinhos, Soalheira e Castelo Novo. A freguesia ocupa uma área de 22,1Km², e tem um total populacional de 805 habitantes de acordo com os censos de 2001. Estes baixos valores populacionais retratam bem o envelhecimento demográfico que as regiões do interior têm sido alvo ao longo dos anos.



Mapa 1 - Enquadramento Geográfico

Casal da Serra situado a 40,03° de latitude e uma altitude 716m, está na vertente sul da Serra da Gardunha, um colosso de granito que se ergue sobre Castelo Branco, atingindo 1227m na sua maior altitude.

A proximidade com esta Serra faz com que em termos hidro-morfológicos seja uma aldeia com declives acentuados, bastante verde e sobretudo com abundância de água, factor importante que contribuiu para “moldar” a sua geografia.

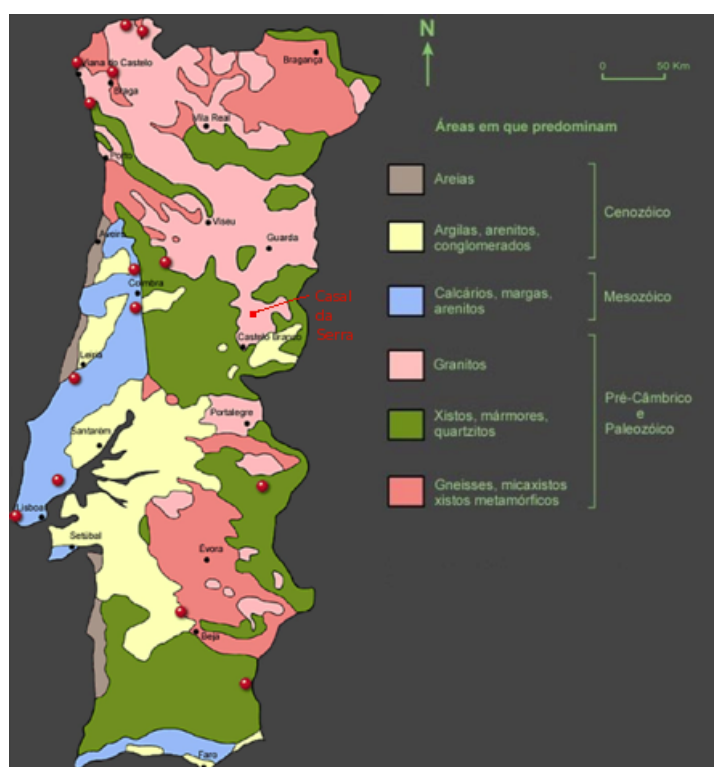
Casal da Serra também está associado às riquezas naturais da Região onde se destaca a barragem do Penedo Redondo e do Pisco.

6.2. Enquadramento geológico

Do ponto de vista geológico as captações das Eirinhas encontram-se localizadas no maciço granítico da Serra da Gardunha, enquadrado no Maciço Hespérico na Zona Centro Ibérica.

Em termos litológicos nesta zona afloram dois complexos importantes nomeadamente:

- O primeiro, Metassedimentar, ante - Ordovícico designado por formação xistosa das beiras, que se insere no período Pré câmbrico Superior Terminal mais frequentemente denominado por Xisto Grauváquico.
- O segundo de idade posterior ao Hércinico conhecido por Granito da Beira, no qual integram formações de idades e granulometrias diferentes (Mapa 2).



Fonte: Adaptado de Pimentel, N. (1994)

Mapa 2 - Mapa Geológico de Portugal

No que se remete à área em estudo é marcada por diversos afloramentos graníticos, com intensas redes de diáclases e fracturas, em alguns locais encontram-se bastante alterados, conferindo à paisagem aspectos geomorfológicos particulares.

6.3. Metodologia Usada

A metodologia seguida consistiu fundamentalmente na recolha de dados bibliográficos, cartográficos e no reconhecimento de campo, de modo a possibilitar a caracterização geológica e hidrogeológica da área em estudo. Durante o reconhecimento de campo foram identificados alguns dos possíveis focos/riscos de contaminação, tal como é possível observar na Figura 19. Foram feitas descargas no local de restos de betuminoso. De facto estas descargas ilegais da maioria das obras geram alterações desfavoráveis no ambiente rural, alteram a drenagem natural, os níveis freáticos, a paisagem e transportam consigo materiais contaminantes, tornando-se necessário prever, evitar ou atenuar tais efeitos com medidas apropriadas.



Figura 19- Deposição de detritos de pavimento betuminoso

Com vista a uma caracterização mais detalhada da captação, procedeu-se à monitorização bimensal entre Abril e Outubro de 2010, da quantidade e qualidade da água, tendo-se medido os seguintes parâmetros físicos-químicos:

- Caudal
- Temperatura
- Condutividade eléctrica
- pH
- Turvação

Na medição do caudal da captação usou-se um recipiente de volume conhecido, medindo-se o tempo necessário para o encher. Em cada campanha realizaram-se três medições de caudal correspondendo o valor final à média dos valores obtidos.

A temperatura foi medida no local das recolhas, com recurso a um termómetro electrónico portátil, da marca Eutech Instruments, modelo EcoScan Series Temp JKT.

A medição dos parâmetros condutividade, pH e turvação realizou-se com a colaboração das Águas do Centro S.A. no laboratório da Estação de Tratamento de Águas de Santa Águeda, no dia de cada campanha.

Na recolha de amostras para análise em laboratório utilizaram-se recipientes apropriados fornecidos pelo laboratório da ETA¹⁵ de Santa Águeda, tendo-se o cuidado no momento das colheitas de encher os recipientes completamente, sem quaisquer bolhas de ar, e rolha-los imediatamente de modo a impedir alterações provocadas pelas trocas gasosas com a atmosfera.

Na elaboração dos mapas recorreu-se ao auxílio do software ArcGis 9.3 e Autocad 2011.

A análise da informação recolhida permitiu delinear recorrendo a métodos analíticos assim como a critérios hidrogeológicos e geomorfológicos o traçado das zonas de restrições específicas que constituem os perímetros de protecção das captações.

6.4. Caracterização das Captações

O subsistema do Casal da Serra é constituído por 21 captações (Tabela 16), sendo que 18 delas são do tipo mina.

As captações de mina, em estudo “Eirinha 1 e Eirinha 2” são galerias subterrâneas artificiais, semi-horizontais que se estendem por algumas dezenas de metros com uma secção típica de aproximadamente 1,80m de altura e 0,60m de largura.

Tabela 16 - Captações do Subsistema do Casal da Serra

M (m)	P (m)	Concelho	Freguesia	Subsistema de Abastecimento	Designação da captação	Intervenção	Tipo de origem	Utilização
251518	344111	Castelo Branco	S. Vicente da Beira	Subsistema Casal da Serra	MINA - FONTANHEIRO	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
251565	344158	Castelo Branco	S. Vicente da Beira	Subsistema Casal da Serra	MINA- BARROQUEIRA N° 1	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
251570	344239	Castelo Branco	S. Vicente da Beira	Subsistema Casal da Serra	MINA- BARROQUEIRA N° 2	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
251680	344231	Castelo Branco	S. Vicente da Beira	Subsistema Casal da Serra	MINA- BARROQUEIRA N° 3	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
251557	344307	Castelo Branco	S. Vicente da Beira	Subsistema Casal da Serra	MINA - VALES	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
251534	344388	Castelo Branco	S. Vicente da Beira	Subsistema Casal da Serra	MINA - LAMEIRA DO NABO N° 1	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
251539	344465	Castelo Branco	S. Vicente da Beira	Subsistema Casal da Serra	MINA - LAMEIRA DO NABO N° 2	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
251727	344574	Castelo Branco	S. Vicente da Beira	Subsistema Casal da Serra	MINA - BOUÇA N° 1	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
251788	344704	Castelo Branco	S. Vicente da Beira	Subsistema Casal da Serra	MINA - BOUÇA N° 2	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
251713	344844	Castelo Branco	S. Vicente da Beira	Subsistema Casal da Serra	MINA - BOUÇA N° 3	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
251709	344984	Castelo Branco	S. Vicente da Beira	Subsistema Casal da Serra	MINA - BOUÇA N° 4	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
250539	344132	Castelo Branco	S. Vicente da Beira	Subsistema Casal da Serra	MINA - CASTANHEIRO	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
251889	343021	Castelo Branco	Louriçal do Campo	Subsistema Casal da Serra	MINA - EIRINHA N° 1	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
251819	342977	Castelo Branco	S. Vicente da Beira	Subsistema Casal da Serra	MINA - EIRINHA N° 2	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
252373	343164	Castelo Branco	Louriçal do Campo	Subsistema Casal da Serra	MINA CORTIÇEIRAS DEPÓSITO	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
252197	343234	Castelo Branco	Louriçal do Campo	Subsistema Casal da Serra	MINA CORTIÇEIRAS SEM PORTA	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
252406	343299	Castelo Branco	Louriçal do Campo	Subsistema Casal da Serra	MINA ALTAS DAS CORTIÇEIRAS N° 1	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
252341	343340	Castelo Branco	Louriçal do Campo	Subsistema Casal da Serra	MINA ALTAS DAS CORTIÇEIRAS N° 2	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
252428	343762	Castelo Branco	Louriçal do Campo	Subsistema Casal da Serra	NASCENTE - CASA CASTELO VELHO	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
252391	343910	Castelo Branco	Louriçal do Campo	Subsistema Casal da Serra	NASCENTE - SEIXAL	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal
251202	343236	Castelo Branco	S. Vicente da Beira	Subsistema Casal da Serra	POÇO DO CASAL	Integrada pela AdC	Subterrânea	Principal

Fonte: Águas do Centro S.A.

Em virtude das características topográficas e da sua localização em zona de montanha, estas minas foram construídas de modo a que o aproveitamento de água se realiza-se de modo gravítico, sendo que os caudais de extracção estão limitados pela disponibilidade de água e pelo calibre das tubagens instaladas à saída das minas, conforme se pode observar na Figura 20.

¹⁵ Estação de Tratamento de Águas

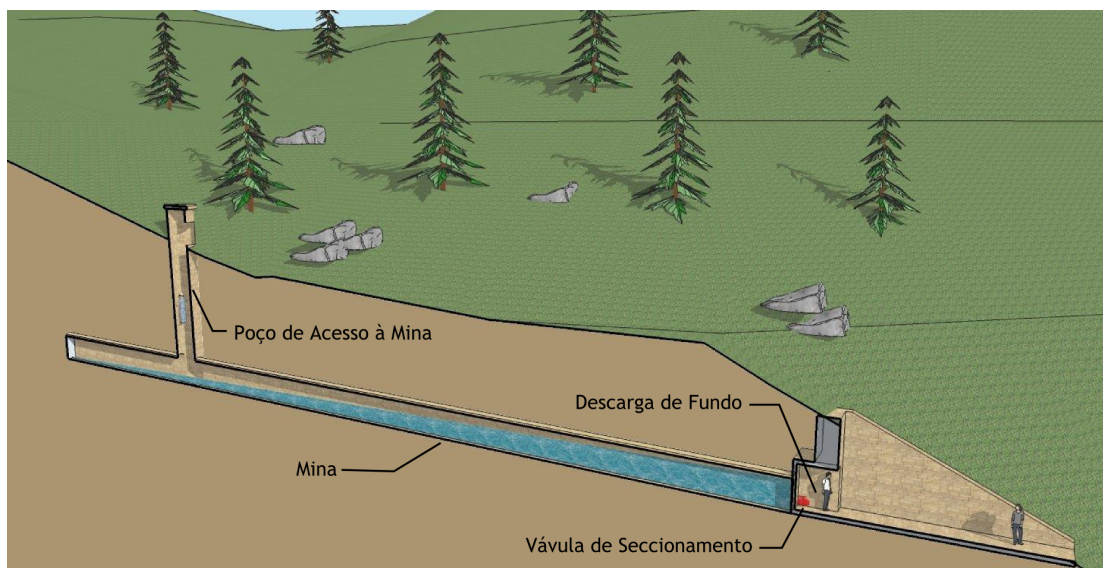


Figura 20 - Esquema de princípio da Mina Eirinha nº 2

As águas provenientes das diversas captações (Figura 21) são conduzidas a uma câmara de junção (Figura 22), que são levadas a um reservatório de armazenamento. Este facto enfatiza a importância do traçado dos perímetros de protecção para estas captações e de um monitoramento adequado, uma vez que no caso de contaminação em uma captação, toda a água captada pelo subsistema para o abastecimento publico, ficará inevitavelmente comprometida.

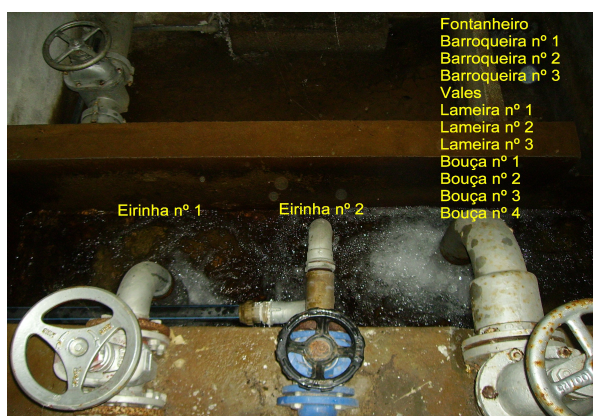


Figura 21 - Captações - Interior da câmara de junção



Figura 22 - Câmara de Junção

O período de monitorização das captações não permitiu abranger um ano hidrológico completo em virtude do calendário disponível para a realização deste trabalho, ainda assim os valores de caudal recolhidos “*in situ*” permitiram traçar um perfil aproximado das captações.

Este período foi suficiente para perceber que existia uma relação quase directa entre os caudais observados e a precipitação (Gráfico 2 e Gráfico 3), este facto permitiu que se estimassem de modo aproximado os caudais para os meses em que não foi possível recolher valores. Assim traçou-se uma curva de tendência para a precipitação, e de seguida encontrou-se a curva de tendência paralela que permitia traduzir os valores de caudal observados, permitindo assim extrapolar os valores em falta (Gráfico 2 e Gráfico 3).

Gráfico 2 - Relação entre a Precipitação e o Caudal na Eirinha nº 1

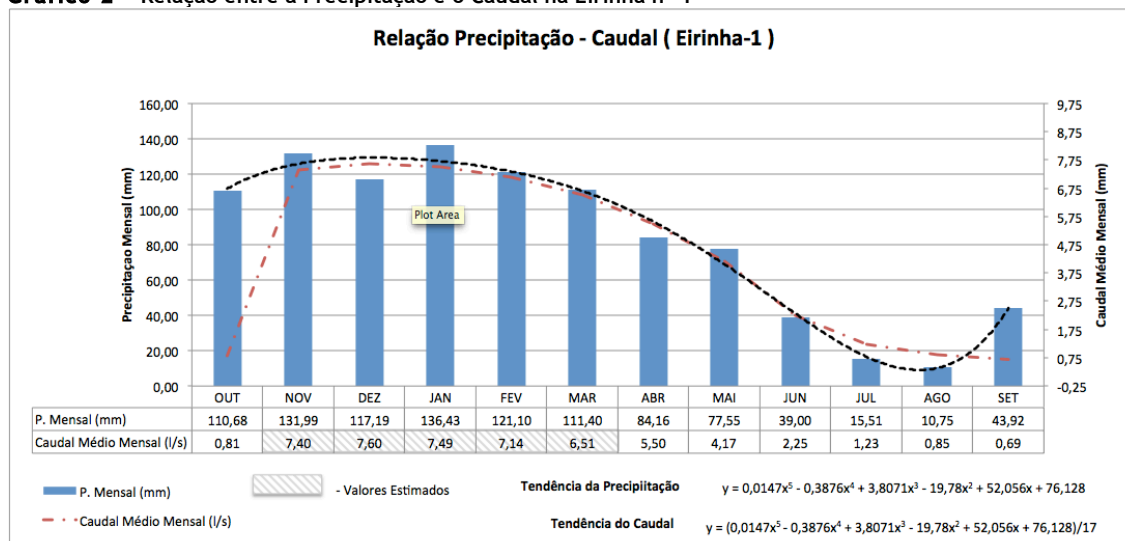
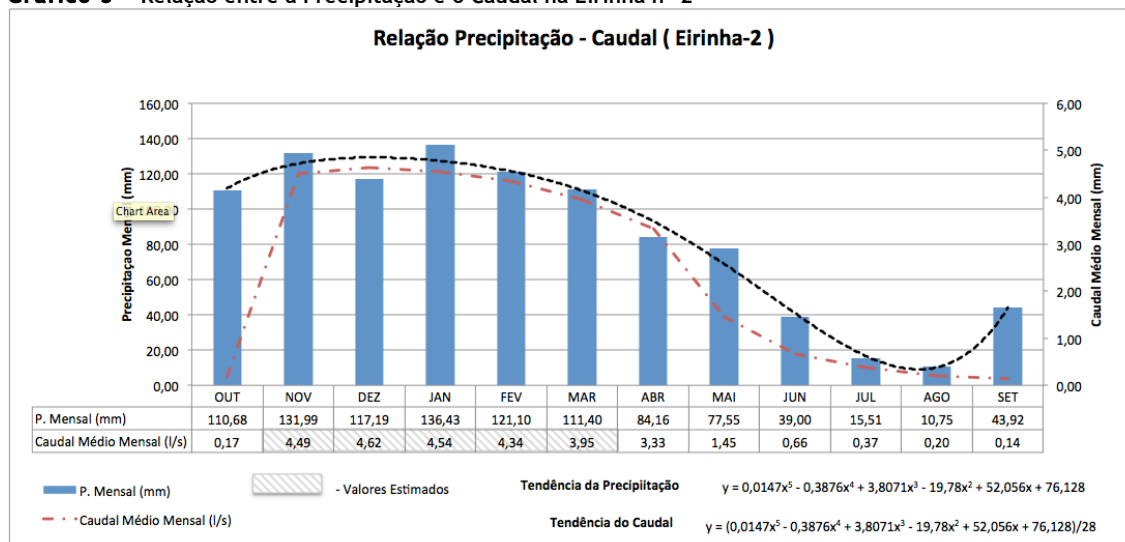


Gráfico 3 - Relação entre a Precipitação e o Caudal na Eirinha nº 2



De acordo com Meinzer (Todd, 1980), as captações podem classificar-se em 8 classes (Tabela 17) em função do valor médio do caudal produzido, onde as captações estudadas se classificam com magnitude média, de 5ª ordem, com caudal médio anual de 4,30l/s e 2,36l/s para a Eirinha nº 1 e Eirinha nº 2 respectivamente.

Tabela 17 - Classificação das captações segundo o caudal médio medido

Classe		Caudal
Ordem	Magnitude	Médio (l/s)
1ª	Elevada	> 10000
2ª		1000 - 10000
3ª		100 - 1000
4ª		10 - 100
5ª	Média	1 - 10
6ª		0.1 - 1
7ª	Baixa	0.01 - 0.1
8ª		< 0.01

Fonte: Adaptado de Meinzer in Todd (1980)

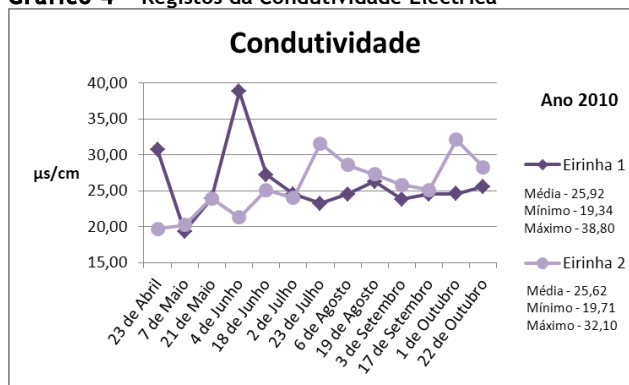
6.5. Caracterização da Água Captada

Numa primeira fase do estudo procedeu-se à monitorização bimensal das captações entre Abril e Outubro de 2010 com intuito de recolher informação que permita afinar o modelo conceitual do aquífero estudado.

Nos gráficos 3 a 6 apresentam-se os valores resumo da condutividade, pH, temperatura e turvação.

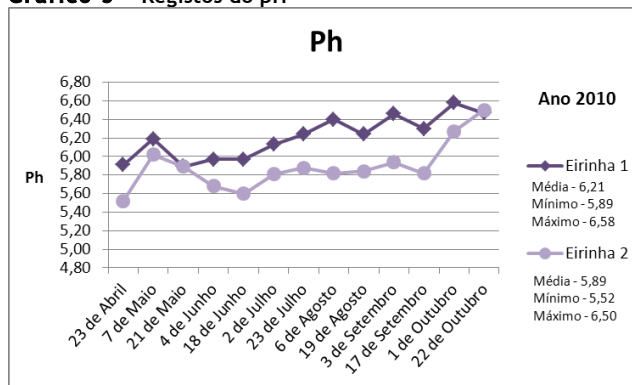
No Gráfico 4, a condutividade eléctrica observada nas captações estudadas apresenta valores baixos, característicos de águas muito pouco mineralizadas. O que sugere que o tempo de interacção com o meio aquífero é igualmente baixo. Algumas variações assim como valores anómalos observados podem atribuir-se a erros ou oscilações próprias do sistema de medição.

Gráfico 4 - Registos da Condutividade Eléctrica



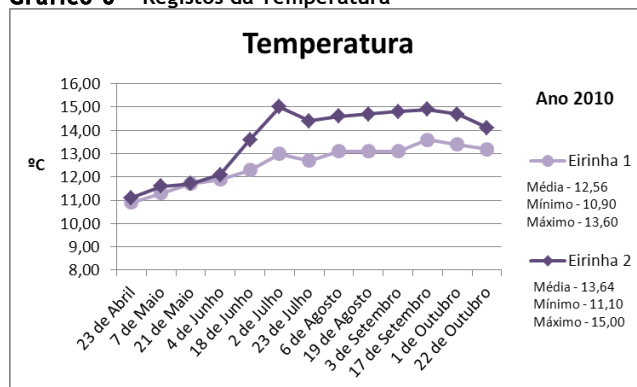
No Gráfico 5, o pH observado, oscila entre 5,52 e 6,58, reflectindo um ligeiro carácter ácido consequência de uma interacção embora reduzida com o maciço granítico rico em sílica.

Gráfico 5 - Registos do pH



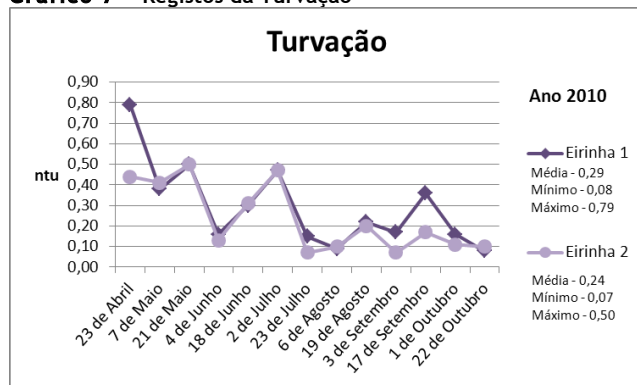
A observação dos registos de temperatura no Gráfico 6, mostra uma sensibilidade às variações sazonais da temperatura com valores menores no Inverno e maiores no Verão, o que indica que são águas de infiltração recente. A temperatura de surgência destas águas varia entre 10,9 e 15,0 °C, pertencendo estas à classe das águas hipotermais.

Gráfico 6 - Registos da Temperatura



Os valores tendencialmente baixos da turvação apresentados no Gráfico 7, levam a supor que apesar de estarmos perante um meio fracturado com nível freático muito próximo da superfície topográfica, a circulação de água no aquífero se faça genericamente através de fracturas preenchidas com material granular, o que permite velocidades de infiltração e circulação no meio mais baixas facultando a filtração de sólidos em suspensão.

Gráfico 7 - Registos da Turvação

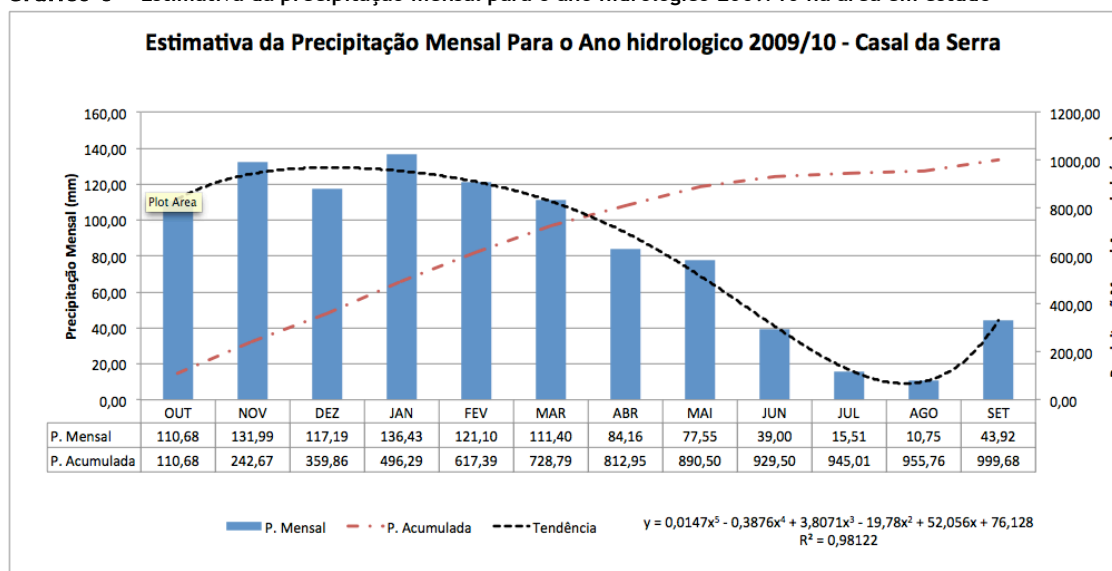


6.6. Precipitação

O conhecimento da precipitação é um elemento crucial na quantificação da recarga de um aquífero, elemento chave para definir uma exploração sustentável e para melhor compreender o modelo conceitual de circulação das águas subterrâneas.

Apesar de não existirem dados relativos à precipitação durante o período de monitorização das captações estudadas para o posto udométrico do Casal da Serra, de acordo com os dados do SNIRH (Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos) o ano hidrológico de 2009/10 apresenta uma precipitação próxima à precipitação média de Portugal Continental com base no período de 1940/41 a 1997/98. Pelo exposto optou-se por trabalhar com os valores da precipitação média para o período de dados disponíveis do posto udométrico do Casal da Serra (1951 a 1998), por se considerar que sejam representativos da precipitação do ano hidrológico 2009/10 (Gráfico 8).

Gráfico 8 - Estimativa da precipitação mensal para o ano hidrológico 2009/10 na área em estudo



A análise estatística das séries de precipitação no posto udométrico, do Casal da Serra, para o intervalo de 1951 a 1998 revelam um valor médio de 999,68mm e um valor máximo de 1881,70mm, apresentando o ano mais seco desta série de dados 374,20mm de precipitação, segundo os registos do SNIRH (2010).

6.7. Balanço Hídrico

No estudo do balanço hídrico para zona em estudo, utilizou-se a metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1948), utilizando a seguinte equação (16):

$$P - (ETR + ALT_{so}) = R_s + ALT_s + G + ALT_{SSO} \text{ (mm)} \quad (16)$$

em que:

P - precipitação,
 ETR - evapotranspiração real,
 R_s - escoamento superficial,
 G - escoamento subterrâneo,
 ALT_s - armazenamento à superfície,
 ALT_{so} - armazenamento no solo arável,
 ALT_{SSO} - armazenamento no subsolo.

O cálculo da evapotranspiração potencial (ETP) efectua-se pelo método de Thornthwaite, com a seguinte equação (17):

$$ETP = K \times ETP_0 \text{ (mm/mês)} \quad (17)$$

em que:

k - factor correctivo correspondente a um parâmetro que depende do n.º de horas de luz do dia, função da latitude, sendo determinado de acordo com valores tabelados em Lencastre e Franco (1984).

ETP₀ - evapotranspiração média para os meses teóricos de 30 dias e 12 horas de luz, num local do equador de latitude zero, sendo:

$$ETP_0 = 16 \times \left(10 \times \frac{T}{I}\right)^a \text{ (mm/mês)} \quad (18)$$

em que:

T - temperatura média diária do mês (°C)
 a - parâmetro dado pela seguinte expressão (19):

$$a = 675 \times 10^{-9} \times I^3 - 771 \times 10^{-7} \times I^2 + 1790 \times 10^{-5} \times I + 0,49 \quad (19)$$

onde:

I - índice de calor anual, expresso por:

$$I = \sum_{j=1}^{12} ij \quad (20)$$

sendo, i, o índice de calor mensal, dado pela seguinte equação (21):

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,5} \text{ (T em } ^\circ\text{C)} \quad (21)$$

Da aplicação das expressões anteriores elaborou-se a Tabela 18, de onde se retiram os valores da evapotranspiração potencial a partir do método de Thornthwaite e Mather para a zona das captações de água subterrânea em estudo.

Tabela 18 - Evapotranspiração potencial - Método de Thornthwaite e Mather

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
T (°C)	2,40	3,00	4,70	6,70	9,20	13,90	17,20	17,00	14,30	9,60	5,60	3,20
i	0,33	0,46	0,91	1,55	2,50	4,64	6,38	6,27	4,84	2,66	1,19	0,51
ETP ₀ (mm)	11,88	14,88	23,41	33,49	46,12	69,96	86,74	85,72	71,99	48,15	27,94	15,88
K	0,80	0,89	0,99	1,10	1,20	1,25	1,23	1,15	1,04	0,93	0,83	0,78
ETP (mm)	9,50	13,24	23,18	36,84	55,35	87,45	106,69	98,58	74,87	44,78	23,19	12,39
		l =	32,23				a =	1,01				

A determinação de todos os termos do balanço hidrológico, apresenta-se na Tabela 19, os diversos termos apresentados definem-se do seguinte modo:

P - precipitação média mensal,

ETP - evapotranspiração potencial

NEG-AC - perda potencial de água, em cada intervalo de tempo do período seco (em que $P < ETP$), sendo:

$$NEG - AC (i) = \sum_{j=1}^i (P - ETP)_j \quad (L < 0) \quad (22)$$

ARM_{so} - armazenamento de água que fica no solo de capacidade utilizável pelas plantas (**CAD**), e se calcula:

no período seco ($P - ETP < 0$), pela seguinte equação (23):

$$(ARM_{so})_i = \left(CAD \times e^{\frac{NEG-AC}{CAD}} \right)_i \quad (23)$$

no período húmido, pela seguinte equação (24):

$$(ARM_{so})_i = (P - ETP)_i + (ARM_{so})_{i-1} \quad (24)$$

se $ARM_{so} < CAD$, até completar a capacidade utilizável pelas plantas, que se considera **CAD = 100mm**

ALT_{so} - variação do armazenamento de água em cada intervalo de tempo, ou seja:

$$ALT_{so(i)} = ARM_{so(i)} - ARM_{so(i-1)} \quad (25)$$

ETR - evapotranspiração real que ocorre em cada intervalo de tempo, ou seja:

$$ETR_i = (P - ALT_{so})_i \quad (ALT_{so} < 0) \quad (26)$$

$$ETR_i = ETP_i \quad (ALT_{so} \geq 0) \quad (27)$$

DEF - défices hídricos nos sucessivos intervalos de tempo i, em que $P < ETP$, sendo:

$$[DEF]_i = [ETP - ETR]_i = [ETP + ALT_{so} - P]_i \quad (ALT_{so} < 0) \quad (28)$$

EXC - excedentes dos sucessivos intervalos de tempo, em que, $P \geq ETP$, sendo:

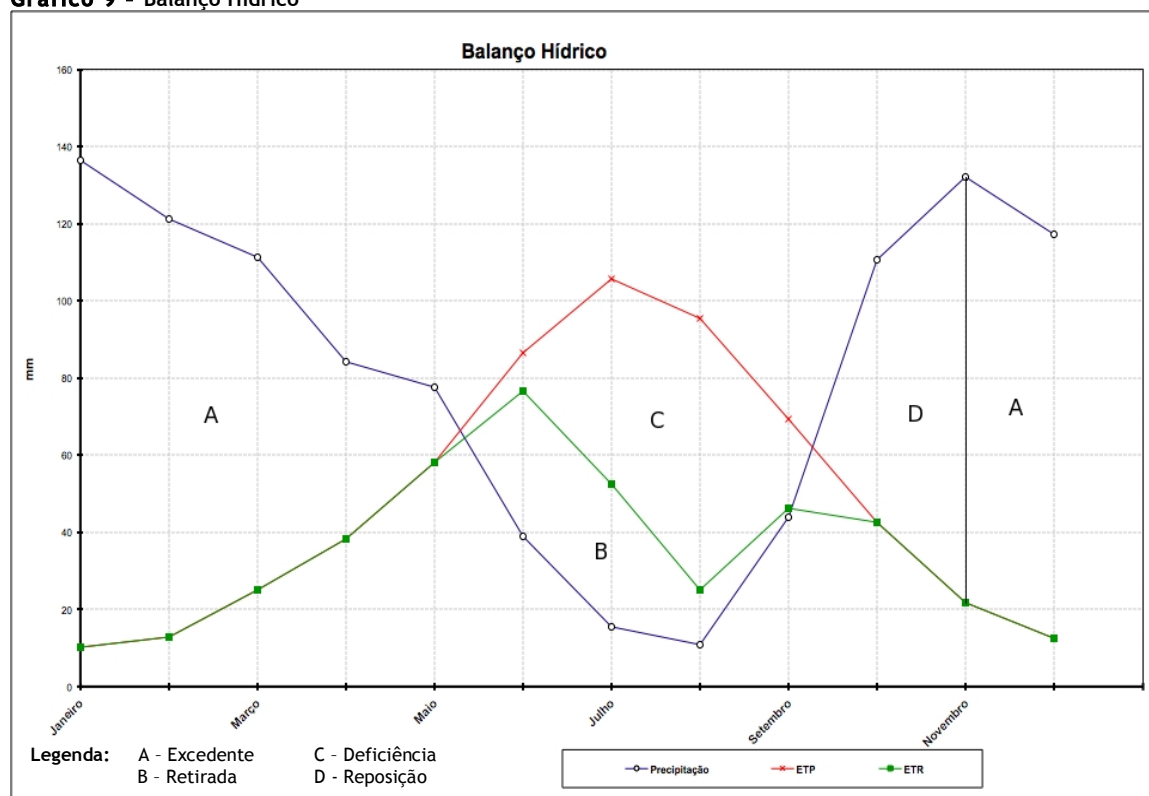
$$[EXC]_i = [P - (ETP + ALT_{so})]_i \quad (ALT_{so} \geq 0) \quad (29)$$

Tabela 19 - Balanço Hidrológico para a zona das captações em estudo

Tempo	Num de	NDA	T	P	N	ETP	P-ETP	NEG-AC	ARM	ALT	ETR	DEF	EXC
Meses	Dias		°C	mm	horas	Thomthwaite1948	mm		mm	mm	mm	mm	mm
Janeiro	31	31	2,4	136,4	9,9	10,15	126,3	0,0	100,00	0,00	10,1	0,0	126,3
Fevereiro	28	62	3,0	121,1	11,2	12,91	108,2	0,0	100,00	0,00	12,9	0,0	108,2
Março	31	90	4,7	111,4	12,4	25,02	86,4	0,0	100,00	0,00	25,0	0,0	86,4
Abril	30	121	6,7	84,2	13,7	38,31	45,9	0,0	100,00	0,00	38,3	0,0	45,9
Maió	31	151	9,2	77,6	14,6	58,14	19,4	0,0	100,00	0,00	58,1	0,0	19,4
Junho	30	182	13,9	39,0	14,8	86,35	-47,4	-47,4	62,28	-37,72	76,7	9,6	0,0
Julho	31	212	17,2	15,5	14,1	105,66	-90,1	-137,5	25,28	-37,00	62,5	53,2	0,0
Agosto	31	243	17,0	10,8	12,9	95,43	-84,7	-222,2	10,84	-14,44	25,2	70,2	0,0
Setembro	30	274	14,3	43,9	11,5	69,22	-25,3	-247,5	8,42	-2,42	46,3	22,9	0,0
Outubro	31	304	9,6	110,7	10,3	42,57	68,1	-26,8	76,53	68,11	42,6	0,0	0,0
Novembro	30	335	5,6	132,0	9,3	21,76	110,2	0,0	100,00	23,47	21,8	0,0	86,8
Dezembro	31	365	3,2	117,2	9,2	12,59	104,6	0,0	100,00	0,00	12,6	0,0	104,6
TOTAIS			106,8	999,7	144,0	578,1			883,4	±91,58	422,2	155,9	577,5
MÉDIAS			8,9	83,3	12,0	48,2			73,6		35,2	13,0	48,1

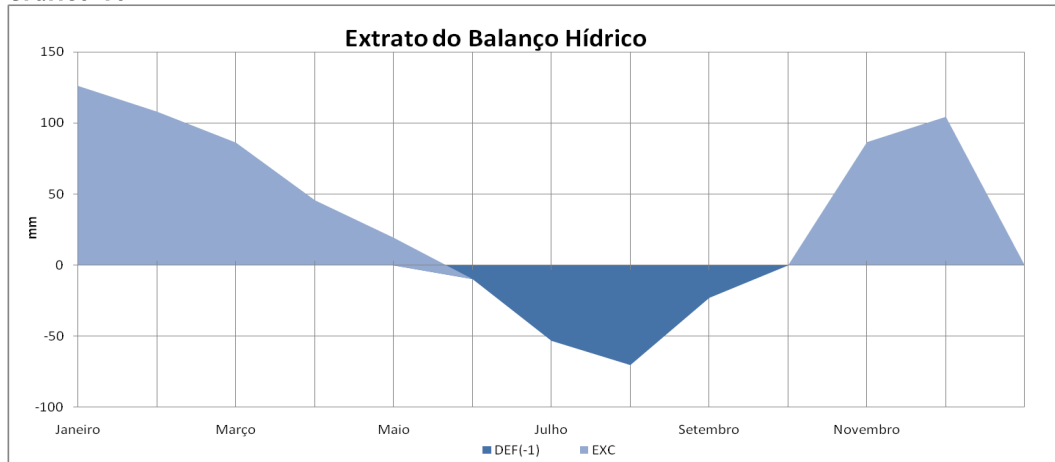
A partir da Tabela 19, do balanço hidrológico, é possível traçar o Gráfico 9, onde se podem delimitar quatro áreas, com base nos valores da precipitação, evapotranspiração potencial e evapotranspiração real, que são as seguintes:

Gráfico 9 - Balanço Hídrico



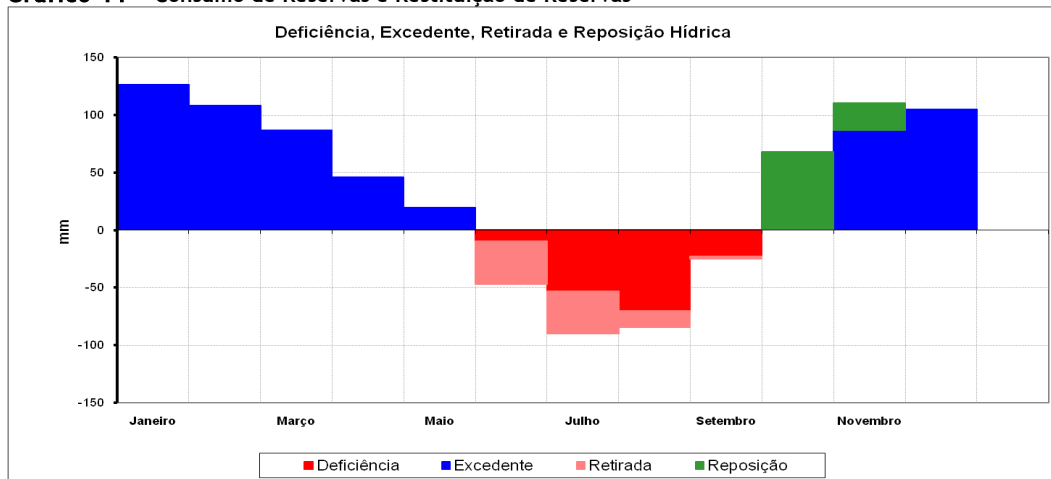
Os excedentes e os défices hídricos definem um período seco e um período húmido, representados no Gráfico 10.

Gráfico 10 - Excedentes e Défices Hídricos



No período seco caracterizado pelos défices hídricos a quantidade de água retirada das reservas pode ser contabilizada pela diferença entre a precipitação e a evapotranspiração real para valores de $ALT(\text{variação no armazenamento de água}) < 0$. Este período vai de Junho a Setembro, atingindo o seu máximo em Agosto. O período húmido, traduzido pelos excedentes hídricos, inicia-se com uma reposição hídrica em Outubro e Novembro que pode ser quantificada pela diferença entre a precipitação e a evapotranspiração real para valores de $ALT > 0$ e termina em Maio (Gráfico 11).

Gráfico 11 - Consumo de Reservas e Restituição de Reservas



6.8. Parâmetros utilizados na aplicação dos métodos seleccionados

Na impossibilidade da determinação experimental de parâmetros necessários aos métodos seleccionados, quer por limitações inerentes ao período definido para a elaboração deste estudo, quer por limitações de recursos, foram atribuídos valores de acordo com bibliografia de referência e trabalhos desenvolvidos em áreas de estudo com características semelhantes. Este facto não afecta de qualquer modo o objectivo primordial deste estudo que visa a comparação dos resultados obtidos por dois métodos diferentes.

- i. O valor de caudal (Q) utilizado corresponde ao caudal médio encontrado com base no cruzamento dos dados obtidos durante o período de monitorização e a precipitação média anual para o ano hidrológico 2009/10. É de referir que este é considerado um ano de precipitação média tendo como referência o período de 1940/41 a 1997/98.
- ii. Para o valor da porosidade eficaz (η), tomou-se como referência o valor do anexo do Decreto-lei nº 382/99, para formações aquíferas em rochas graníticas.
- iii. A espessura saturada (H) corresponde ao valor medido na vertical entre a base da captação e o topo da superfície freática. Com base nos valores tipicamente observados pelos funcionários responsáveis pela manutenção das minas, tomou-se como 7m um valor médio observado nos lanternins de acesso ao interior das minas.
- iv. O valor da condutividade hidráulica (K) considerado para as formações geológicas graníticas de acordo com Davis, (Davis, 1969), foi de $3.24 \times 10^{-6} \text{m/s}$.
- v. O valor do gradiente hidráulico (i), foi considerado equivalente ao declive médio da bacia hidrográfica, uma vez que se assume o nível freático paralelo à superfície topográfica e pequena profundidade.

6.9. Condicionantes na aplicação dos Métodos de Wyssling e Raio Fixo a Captações de Mina

Os métodos de Wyssling e do Raio Fixo são vocacionados para captações verticais, com caudais bombeados na própria captação, pressupondo que o fluxo de água ocorre oriundo de todas as direcções na captação. Pelo exposto e face ao facto de estarmos perante captações de mina semi-horizontais com ressurgências ao longo do seu desenvolvimento, originadas por singularidades geológicas (falhas, filões, diáclases) tornou-se necessário propor algumas adaptações na aplicação directa destes métodos.

Assim entendeu-se que em qualquer ponto ao longo da recta que define a projecção horizontal da mina, sejam validos os limites impostos por cada um dos métodos.

Na aplicação do método do raio fixo calculado propõe-se que o perímetro que define a área em torno da projecção horizontal da mina (Figura 23) para as zonas imediata, intermédia e alargada seja dado pela seguinte equação:

$$2C_{PHM} + 2\pi r = \text{Perímetro da Zona de Protecção} \quad (30)$$

em que:

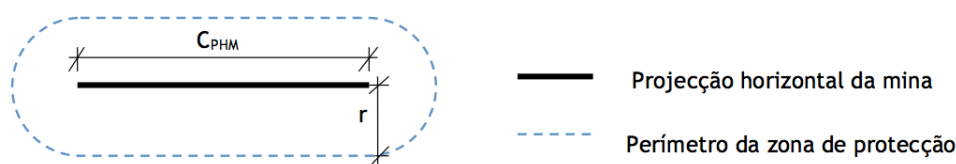
C_{PHM} - Comprimento da projecção horizontal da mina
 r - raio fixo calculado

$$r = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{n \cdot H \cdot \pi}} \quad (31)$$

então:

$$\text{Perímetro da Zona de protecção} = 2C_{PHM} + 2\pi \left(\sqrt{\frac{Q \times t}{\eta \times H \times \pi}} \right) \quad (32)$$

- Q - caudal de exploração da captação (m³/d)
- t - tempo de propagação (d)
- n - porosidade eficaz do aquífero
- H - espessura saturada na captação
- r - raio do perímetro de protecção (m)



Fonte: Elaboração própria

Figura 23 - Perímetro da zona de protecção da mina

A metodologia a adoptar para o método de Wyssling passa por aplicar no ponto mais a montante e mais a jusante da projecção horizontal da mina o método de Wyssling, simulando a existência em cada uma das extremidades da mina de poços virtuais, e em seguida traçar a envolvente às zonas de protecção encontradas. Esta metodologia faz mais sentido na definição da zona imediata, uma vez que as zonas intermédia e alargada à priori superam largamente o comprimento da mina. Este critério não dispensa no entanto a análise caso a caso, estendendo-se se necessário às zonas intermédia e alargada de modo a garantir a protecção adequada ao longo de captações semi-horizontais.

6.10. Vulnerabilidade à Poluição - Índice DRASTIC

De modo a caracterizar a vulnerabilidade à poluição da zona em estudo, aplicou-se o Índice DRASTIC normal para formações graníticas, pelo que se obtiveram para as captações Eirinhas os resultados apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Índice DRASTIC

Unidade	Parâmetro	Classe	Índice	Peso	Índice Parcial	DRASTIC Total	Vulnerabilidade
Formações Graníticas	D	4,6 a 9,1m	7	5	35	105	Baixa
	R	51 a 102mm	3	4	12		
	A	3 - 5	4	3	12		
	S	Fino/Ausente	10	2	20		
	T	12 - 18	3	1	3		
	I	R. Ígneas	4	5	20		
	C	< 4,1 m/d	1	3	3		

De modo a uma caracterização mais estreita que a proposta pelo método DRASTIC apresentado no ponto 4.4, recorreu-se às adaptações introduzidas por Ferreira Gomes (2001) a este método. De acordo com o autor citado pode-se apresentar uma classificação em termos de percentagem (Tabela 21), considerando 0% para o índice 23, e 100% para o índice 226, revelando a zona em estudo uma vulnerabilidade qualitativa muito baixa.

Tabela 21 - Relação entre o Índice DRASTIC geral e o potencial à vulnerabilidade de acordo com Ferreira Gomes (2001)

Índice DRASTIC geral - I_D	Potencial à Vulnerabilidade (%)	Vulnerabilidade Qualitativa
<80	<30	Praticamente Nula
80 - 90	30 - 39	Extremamente Baixa
100 - 119	40 - 49	Muito Baixa
120 - 139	50 - 59	Baixa
140 - 159	60 - 69	Média
160 - 179	70 - 79	Alta
180 - 199	80 - 89	Muito Alta
>199	>90	Extremamente Alta

Fonte: Adaptado de Mendes, (2006)

A vulnerabilidade à poluição encontrada em zonas declivosas constituídas essencialmente por granitóides, é frequentemente baixa, sendo portanto este resultado um valor típico. Neste tipo de formações podem no entanto encontrar-se vulnerabilidades localizadas superiores, como é o caso de “fracturas abertas” que permitem o transporte dos poluentes até profundidades e/ou distâncias consideráveis.

6.11. Aplicação do Decreto-Lei nº 382/99 de 22 de Setembro

Da aplicação do Decreto-Lei 382/99 de 22 de Setembro, que propõe a metodologia designada de “Método do Raio Fixo” apresentada no ponto 5.3.2.1, resultam as zonas de protecção apresentadas no Mapa 3 e Mapa 4 para as Eirinhas nº 1 e nº 2.

De acordo com o Decreto-lei supra citado, as captações em estudo, enquadram-se em sistemas aquíferos do Tipo 5.

Assim, para sistemas aquíferos do tipo 5, formações ígneas ou metamórficas fissuradas, são estabelecidos os seguintes critérios:

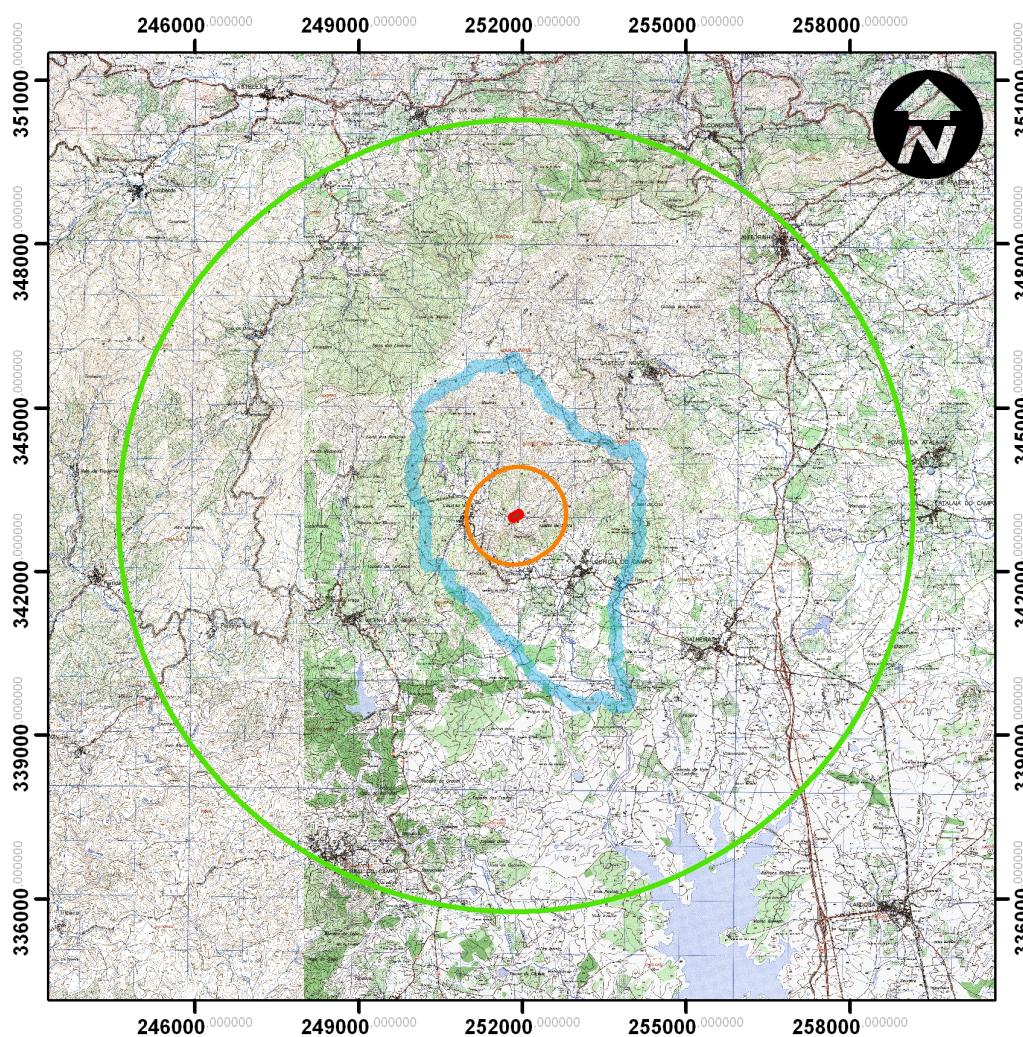
- Zona de Protecção Imediata: $r = 60\text{m}$ (r é o raio da zona de protecção);
- Zona de protecção Intermédia: r é o maior valor entre 140m e (r para $t=50$ dias);
- Zona de Protecção Alargada: r é o maior valor entre 1200m e (r para $t=3500$ dias).

A definição destas zonas resulta da aplicação dos parâmetros presentes na Tabela 22:

Tabela 22 - Parâmetros de cálculo para a Mina Eirinha nº1 - Método do Raio Fixo Calculado

Captação	Q (m ³ /s)	η	H (m)	Zona Imediata r = (m)	Zona Intermédia r = (m)	Zona Alargada r = (m)
Eirinha nº 1	0.00760	0.002	7	60	864	7229

Mapa 3 - Perímetro de protecção para a Mina Eirinha nº1 calculado pelo Método do Raio Fixo Calculado



Legenda:

- Projecção Horizontal da Mina
- Zona de Protecção Imediata
- Zona de Protecção Intermédia
- Zona de Protecção Alargada
- Sub-Bacia Hidrográfica

Eirinha n.º 1

M = 251889 (m)
P = 343021 (m)

0 1.250 2.500 5.000
Meters

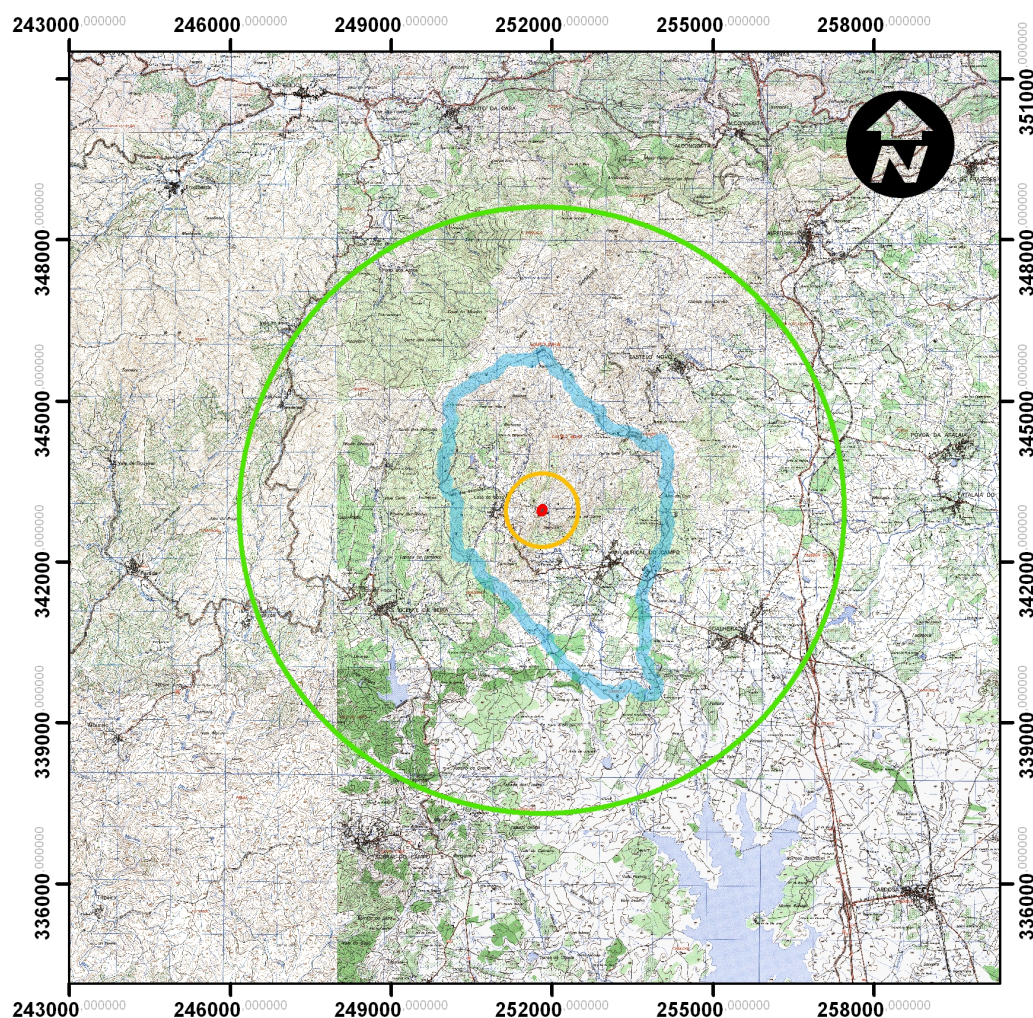
Como resultado dos valores presentes na Tabela 22, foi possível criar o Mapa 3, para a Mina Eirinha nº 1, no qual se podem observar os limites das 3 zonas de protecção propostas pela metodologia preconizada no Decreto-Lei 382/99 de 22 de Setembro.

Seguindo a mesma metodologia elaborou-se o Mapa 4 para a Mina Eirinha nº 2, com base nos parâmetros apresentados da Tabela 23.

Tabela 23 - Parâmetros de cálculo para a Mina Eirinha nº2 - Método do Raio Fixo Calculado

Captação	Q (m ³ /s)	η	H (m)	Zona Imediata r=(m)	Zona Intermédia r=(m)	Zona Alargada r=(m)
Eirinha nº 2	0.00462	0.002	7	60	674	5636

Mapa 4 - Perímetro de protecção para a Mina Eirinha nº2 - calculado pelo Método do Raio Fixo Calculado



Legenda:

- Projecção Horizontal da Mina
- Zona de Protecção Imediata
- Zona de Protecção Intermédia
- Zona de Protecção Alargada
- Sub-Bacia Hidrográfica

Eirinha n.º 2

M = 251819 (m)
P = 342977 (m)

0 1.250 2.500 5.000
Meters

Os perímetros retratados nos mapas 3 e 4 revelam numa primeira análise uma protecção excessiva para a zona alargada que se estende muito além dos limites da suposta zona de recarga definida pelos limites da sub-bacia hidrográfica. Outro aspecto não menos relevante assenta no facto das zonas de protecção apresentarem as mesmas restrições a jusante que a montante, situação que só seria válida caso se estivesse perante um aquífero verdadeiramente confinado, com a superfície piezométrica horizontal, sendo a captação o único elemento drenante com caudal constante e sem direcções preferenciais de fluxo. Os resultados obtidos são consequência de um método que considera um número muito limitado de factores, e que não leva em conta aspectos importantes como o gradiente hidráulico, limites de fluxo e outros.

Face ao exposto, optou-se numa segunda fase por aplicar o método de Wyssling às captações em estudo.

6.12. Aplicação do Método de Wyssling

A escolha do método de Wyssling em contraposição ao método preconizado no Decreto-Lei nº 382/99 vem no seguimento de algumas características apresentadas por este método no ponto 5.3.2.3, que se consideram mais adequadas à geomorfologia das captações em estudo.

A validação numa primeira fase, da aplicação deste método, passou por se considerar que a elevada densidade de fracturação apresentada pela zona em estudo, permite admitir o aquífero como um meio poroso e homogéneo. Vários estudos realizados em meios com características similares apresentam segundo o Instituto Tecnológico GeoMinero de España (ITGE, 1991) resultados bastante satisfatórios e adequados à realidade.

Este método considera o gradiente hidráulico do maciço, tendo como vantagem uma medida mais proteccionista a montante do que a jusante da captação, o que se adequa a zonas com declives acentuados.

Nos mapas 3 e 4, apresentam-se os perímetros de protecção para as Eirinhas nº 1 e nº 2 respectivamente, de acordo com o método de Wyssling.

A definição destas zonas resulta da aplicação dos dados da Tabela 24.

Tabela 24 - Parâmetros de calculo para as Minas Eirinhas n.º 1 e n.º 2 - Método de Wyssling

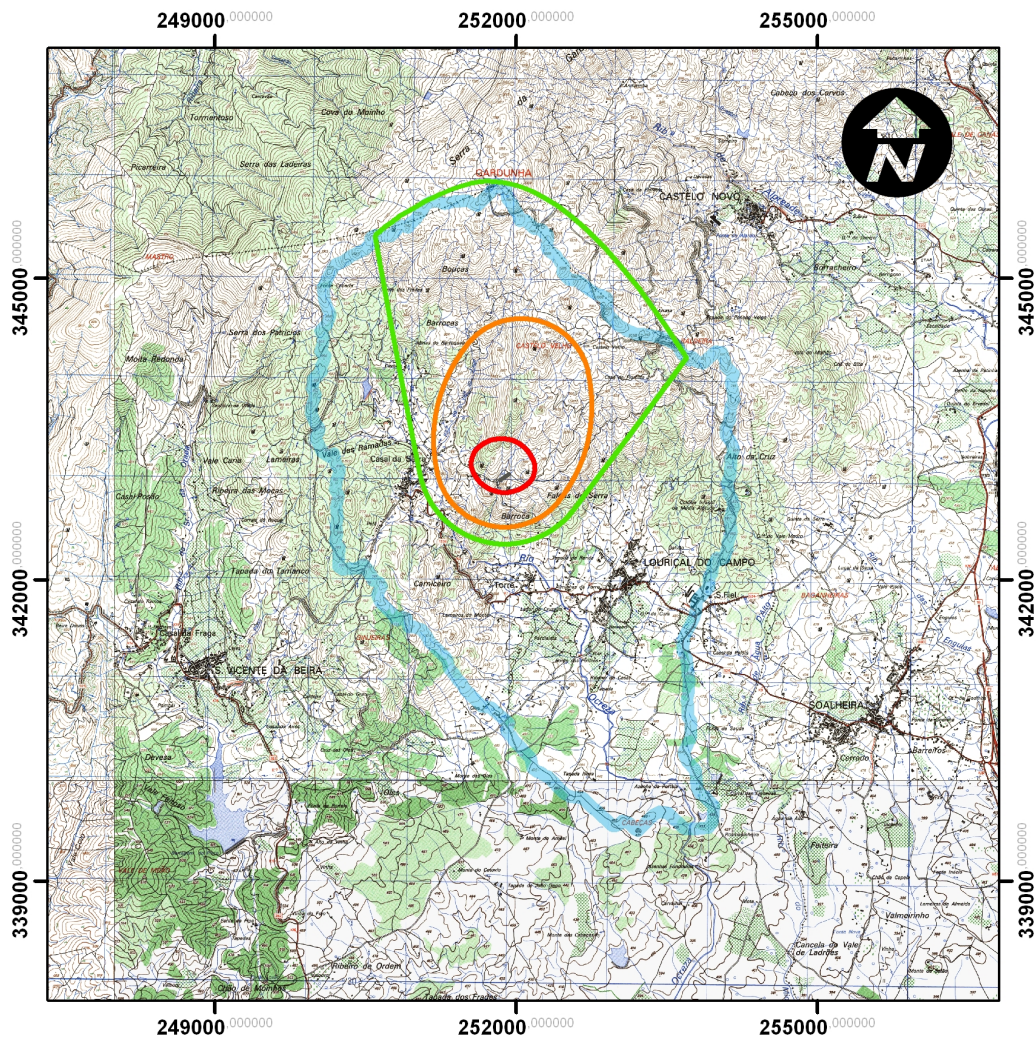
Captação	Q (m ³ /s)	η	H (m)	K (m/s)	i
Eirinha nº 1	0.00760	0.002	7	3.24x10 ⁻⁶	0.169
Eirinha nº 2	0.00462	0.002	7	3.24x10 ⁻⁶	0.169

Assim para a mina Eirinha nº1 obtêm-se os valores paramétricos apresentados na Tabela 25 que definem as 3 zonas de protecção.

Tabela 25 - Parâmetros que definem as zonas de protecção para a Eirinha n.º 1 - Método de Wyssling

Eirinha n.º 1	S_0 (m)	S_u (m)	X (m)	X_0 (m)	B (m)	B' (m)
Z. Imediata t= 1 dia	107.82	84.17	23.65	191.84	1205.35	602.67
Z. Intermédia t= 50 dias	1487.74	305.01	1182.73	191.84	1205.35	602.67
Z. Alargada t= 3500 dias	83172.98	381.91	82791.07	191.84	1205.35	602.67

Mapa 5 - Perímetro de protecção para a Mina Eirinha n.º 1 - calculado pelo Método de Wyssling



Legenda:

- Projecção Horizontal da Mina
- Zona de Protecção Imediata
- Zona de Protecção Intermédia
- Zona de Protecção Alargada
- Sub-Bacia Hidrográfica

Eirinha n.º 1

M = 251889 (m)
P = 343021 (m)

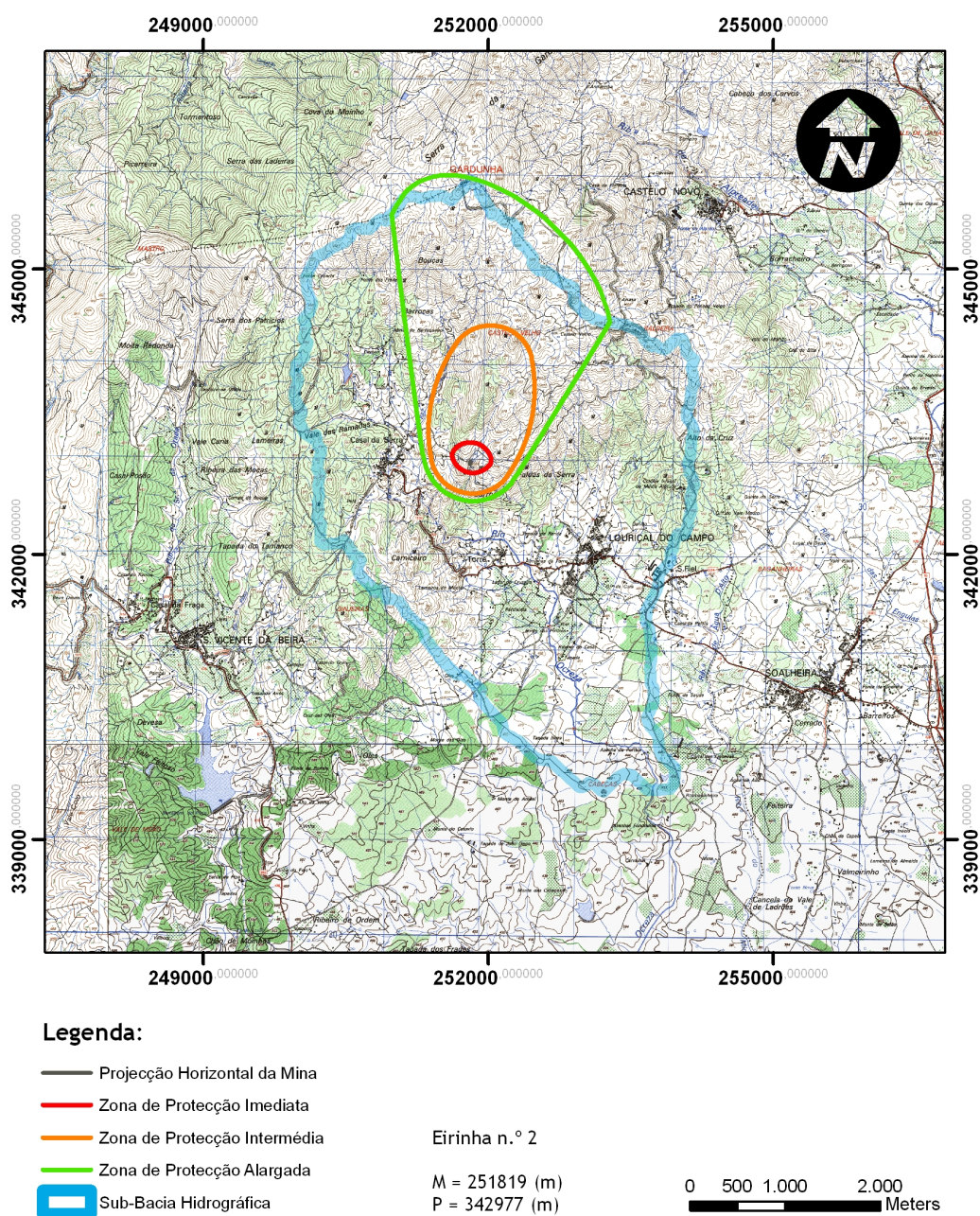
0 500 1.000 2.000
Meters

Seguindo a mesma metodologia elaborou-se a Tabela 26 com os valores paramétricos que definem as 3 zonas de protecção para a mina Eirinha n.º2, representados no Mapa 6.

Tabela 26 - Parâmetros que definem as zonas de protecção para a Eirinha n.º 1 - Método de Wyssling

Eirinha n.º 2	S_0 (m)	S_u (m)	X (m)	X_0 (m)	B (m)	B' (m)
Imediata t= 1 dia	134.59	110.93	23.65	315.58	1982.82	991.41
Intermédia t= 50 dias	1638.36	455.63	1182.73	315.58	1982.82	991.41
Alargada t= 3500 dias	83417.48	626.41	82791.07	315.58	1982.82	991.41

Mapa 6 - Perímetro de protecção para a Mina Eirinha n.º2 - calculado pelo Método de Wyssling



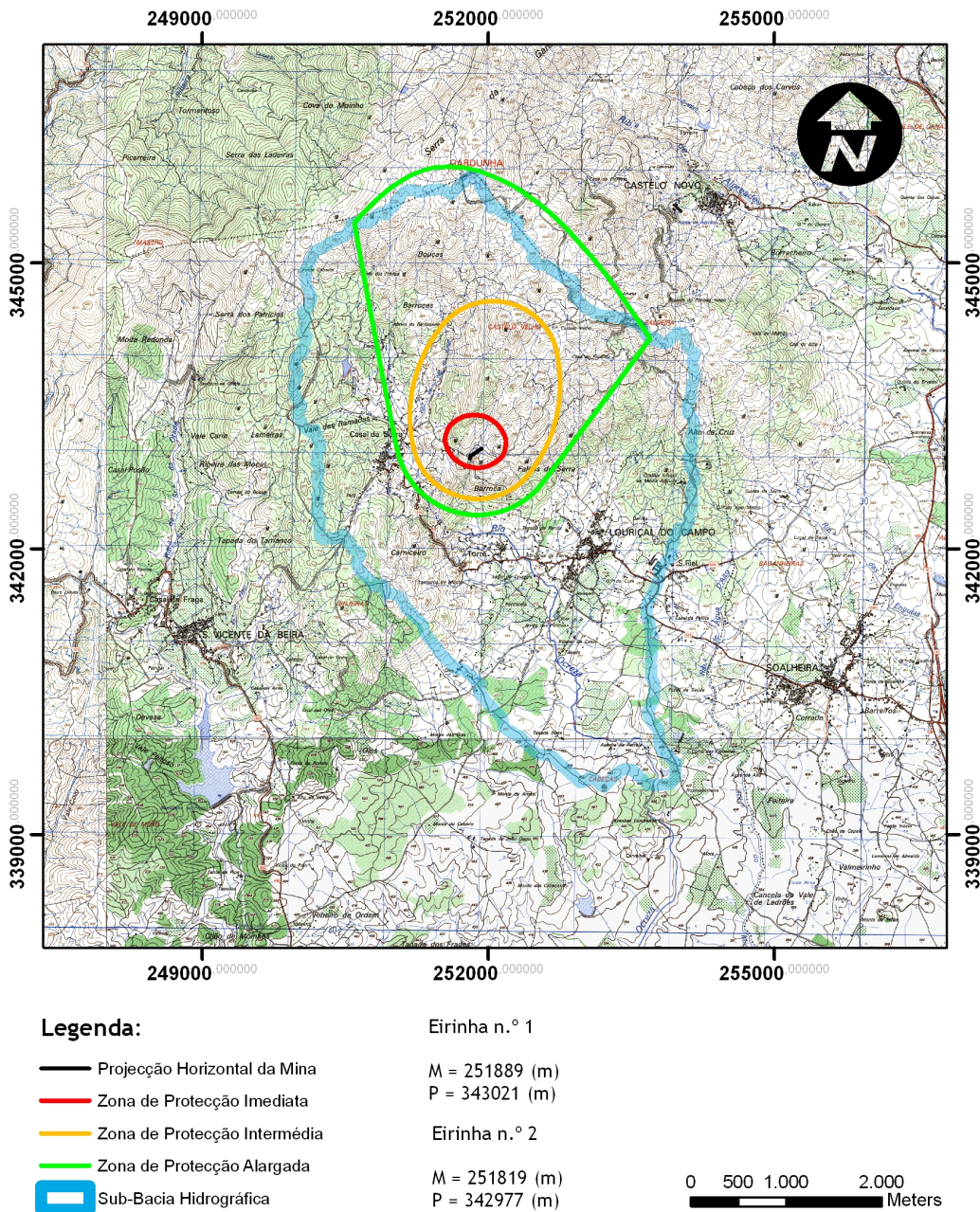
A aplicação do método de Wyssling apresenta como seria de esperar medidas mais proteccionistas a montante que a jusante das captações, no entanto as zonas de protecção imediata e intermédia apresentam protecções superiores quer a montante quer a jusante, que as calculadas pelo método do raio fixo calculado, sendo na definição da zona de protecção alargada que este método se revela mais vantajoso para as captações em estudo.

A montante das captações verifica-se que os valores calculados para a zona alargada abrangem uma área muito muito extensa para além da suposta zona de recarga das captações, pelo que em presença de uma zona de vulnerabilidade muito baixa se considerou truncar a zona a montante pela divisória hidrogeológica de águas definida pela cabeceira da sub-bacia hidrográfica.

6.13. Proposta de Perímetro de Captação para as Captações Eirinhas nº1 e nº2

Devido à proximidade das captações, as zonas de protecção das Eirinhas nº1 e nº 2 sobrepõem-se, pelo que se decidiu abordá-las com um único perímetro de protecção resultante da sobreposição dos dois perímetros. Assim sendo propõe-se o perímetro de protecção apresentado no Mapa 7, para ambas as captações Eirinhas.

Mapa 7 - Proposta de Perímetro de protecção para as Minas Eirinhas nº1 e nº2 - Método de Wyssling



7. Considerações Finais

A caracterização hidrogeológica das formações, permite a obtenção de informação importante acerca da profundidade e disponibilidade dos níveis freáticos. Ao mesmo tempo que permite verificar as potencialidades e qualidades das águas subterrâneas, como o funcionamento hidráulico dos sistemas aquíferos e factores de degradação. Entre estes factores, salientam-se aqueles que influenciam na quantidade e na qualidade dos recursos hídricos subterrâneos. A necessidade de proteger estes recursos, (principalmente da qualidade), vai de encontro às políticas de implementação de perímetros de protecção para as captações de águas subterrâneas, Partidário (1999).

Os dados levados em consideração para caracterização da zona em estudo, foram de diversa índole, entre eles destacam-se os dados geomorfológicos e hidroclimatológicos.

A caracterização hidrogeológica desenvolvida neste trabalho veio a confirmar, algumas das expectativas iniciais sobre a hidrogeologia da região. De facto, estamos perante um meio cristalino intensamente fissurado, favorável à ocorrência de aquíferos, exibindo um comportamento misto de características porosas e fissuradas.

O fluxo de água subterrânea, aproximadamente paralelo à topografia, não atinge profundidades elevadas, evidenciando tempos de residência curtos como o revela a baixa mineralização destas águas.

A manutenção dos caudais durante o período seco deve-se provavelmente à capacidade de armazenamento das áreas de alteração no interior da zona de recarga.

Por sua vez, a muito baixa vulnerabilidade à poluição apresentada, é típica de zonas com declives acentuados, marcadas por diversos afloramentos graníticos.

Um aspecto importante a destacar na realização deste estudo, reside no facto de não ser possível utilizar informação relativa a estruturas geológicas (filões, falhas, diáclases), face à ausência de estudos desta índole na área em foco e à impossibilidade dos mesmos se realizarem, em virtude da calendarização disponível, para a execução deste trabalho.

Esta informação ter-se-ia revelado crucial na aferição das zonas de protecção obtidas pelos métodos utilizados neste estudo, assim como na definição da área de recarga das captações. Salienta-se assim que a área de recarga delimitada é resultado de uma aproximação face aos dados disponíveis, permitindo assinalar qual a zona onde provavelmente ocorre grande parte da recarga do aquífero. A área de recarga real é presumivelmente muito mais vasta e controlada pelas fracturas que atravessam as sub-bacias hidrográficas.

Recorreu-se a métodos e técnicas que serviram de base para a definição dos Perímetros de Protecção das Eirinhas nº 1 e nº 2, sendo eles o método do Raio Fixo Calculado e método de Wyssling.

A metodologia seguida no decurso deste trabalho levou às seguintes conclusões:

A utilização do Decreto-Lei 382/99 (Método do Raio Fixo Calculado) na definição dos perímetros de protecção das captações das Eirinhas, revela um método relativamente simples e pouco dispendioso na sua aplicação. Os resultados obtidos são no entanto pouco precisos, consequência de um método que considera um número muito limitado de factores, e que não leva em conta aspectos importantes como o gradiente hidráulico, limites de fluxo entre outros.

Este método calcula zonas de protecção circulares centradas na captação, conduzindo à ocorrência de uma sobreprotecção a jusante das captações estudadas.

Os perímetros calculados para as Eirinhas nº 1 e nº 2, revelam ainda uma protecção presumivelmente excessiva a montante, para a zona alargada que se estende muito além dos limites da suposta zona de recarga.

A utilização deste método pode no entanto representar uma mais-valia numa primeira fase do estudo dos perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas.

A aplicação do método de Wyssling tem em consideração o gradiente hidráulico do aquífero, permitindo o cálculo das distâncias a montante e a jusante das captações, resultando em medidas proteccionistas a jusante das captações mais racionais e ajustadas à realidade.

Este método tal como outros métodos analíticos não considera fronteiras hidrogeológicas, heterogeneidades do aquífero, a recarga, entre outros factores. Apresenta ainda o inconveniente de não permitir o cálculo de distâncias de protecção na direcção perpendicular à direcção do fluxo.

Ainda assim os resultados obtidos pelo método de Wyssling revelam-se mais satisfatórios e adequados às características geomorfológicas da zona em estudo, acarretando consigo menores servidões administrativas.

A determinação da zona de protecção imediata pelo método de Wyssling determinou uma distância a montante como a jusante superior ao método do Decreto-Lei 382/99. Assim considerou-se a hipótese de limitar essa distância aos valores obtidos pela aplicação do Decreto-Lei 382/99. No entanto, a lacuna de informação relativamente à localização de filões, falhas, diáclases levou a considerar os resultados obtidos em detrimento dos propostos pelo método do Raio Fixo calculado.

Aplicando ainda o método Wyssling, procedeu-se na definição da zona intermédia com distâncias inferiores a jusante, mas mais extensas a montante das captações.

Na zona de protecção alargada o método de Wyssling surge com valores aparentemente excessivos, pelo que se considerou truncar a área a montante pelo limite que define a presumível zona de recarga, delimitada pela cabeceira da sub-bacia hidrográfica. Este facto sugere que o método de Wyssling, não seja provavelmente o mais adequado à definição da zona de protecção alargada das captações estudadas, sendo merecedor de uma nova abordagem em futuros desenvolvimentos deste trabalho.

Deste modo, face à proximidade geográfica das captações, as zonas de protecção das Eirinhas nº1 e nº 2 apresentavam-se sobrepostas, após cálculo dos perímetros, pelo que se decidiu abordá-las com um único perímetro de protecção resultante da envolvente dos seus perímetros individualmente.

No termino deste estudo, conclui-se que a definição racional de perímetros de protecção resulta da conjugação de várias metodologias e da quantidade e qualidade da informação disponível, obtendo-se assim uma importante ferramenta no planeamento e na gestão dos aquíferos.

Bibliografia

ÁGUAS DO CENTRO S.A. (2010). “Captações do subsistema de abastecimento de Casal da Serra” Informação disponibilizada pela instituição, Castelo Branco

ALLER ET AL. (1987). “Drastic: a Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Using Hydrogeologic Settings.” United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Ada, Oklahoma, EPA/60072-877035(PB87-2139149

CALÇADA, I. (2009). “Definição de perímetros de protecção de captações de água subterrânea do concelho de Serpa” Curso de Especialização de Pós-Graduação em Geologia Aplicada, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa

CENSOS. (2001). “XIX Recenseamento Geral da População, III Recenseamento Geral da Habitação”, [CD-ROM], Versão 1.0, Instituto Nacional de Estatística, Lisboa

CHIANG, W.H, ET AL.(1998). “Aquifer Simulation Model for Windows- Groundwater flow and transport modeling, an integrated program” Gebrüder Borntraeger Berlin, Stuttgart, p22

CRUZ, J. (1997). “Objectivos e critérios para a elaboração das propostas de fixação dos perímetros de protecção” *In*. “Preservação da qualidade das águas minerais naturais e águas das nascentes”, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, p30-46

DAVIS,S.N.(1969). “Porosity and permeability of natural materials”, Academic Press, New York

DECRETO-LEI nº 15/401, de 17 de Abril de 1928: Águas Minerais.

DECRETO-LEI n.º 236/98 de 1 de Agosto: Estabelece normas, critérios e objectivos de qualidade com a finalidade de proteger o meio aquático.

DECRETO-LEI nº46/94, 22 de Fevereiro: Estabelece o regime de licenciamento da utilização do domínio hídrico sob jurisdição do Instituto da Água.

DECRETO-LEI n.º45/94 de 22 de Fevereiro: Regula o processo de planeamento dos recursos hídricos e a elaboração e aprovação dos planos de recursos hídricos.

DECRETO-LEI n.º 86/90 de 16 de Março: Aprova o regulamento de águas minerais.

DECRETO-LEI nº84/90, de 16 de Março: Aprova o regulamento da exploração das águas das nascentes.

DECRETO-LEI n.º90/90 de 16 de Março: Regime geral de revelação e aproveitamento dos recursos geológicos.

DECRETO-LEI n.º382/99 de 22 de Setembro: Define perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas.

EPA. (1991). "Delineation of Wellhead Protection Areas in Fractured Rocks." United States Environmental Protection Agency, Office Water (WH-550G), EPA 570/9-91-009

EPA.(1994). "Ground Water and Wellhead Protection: Handbook." United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Office of Water, EPA/625/R-94/001.

EPA.(1987). "Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas." United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Office of Ground-Water Protection, Washington, D.C.20460, PB88-111430

EPA.(1993). "Wellhead Protection in Confined, Semi-Confined, Fractured, and Karst Aquifer Settings Office of Water" (WH-550), EPA/810-K-93-001

EVERETT, A.G. (1987). "Some significant attributes of aquifers as related to wellhead protection considerations." Unpublished report to the U.S. Environmental Protection Agency, office of groundwater protection

FOSTER,S.S.D.(1987). "Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy" *In*: W. VAN DUJVANBOODEN AND H.G. VAN WAEGENINGH (EDS), "Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution", Proceedings and Information No. 38 of the International Conference held in the Netherlands, in 1987, TWO Committee on Hydrological Research, Delft The Netherlands

FRANCO, F.M, LENCASTRE, A. (1992). "Lições de Hidrologia" Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Lisboa

ITGE. (1991). "Guia Metodologica para la Elaboración de Perímetros de Protección de Captaciones de Aguas Subterráneas." Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Madrid

LEI N.º58/2005 de 29 de Dezembro: Lei da água

LEITÃO, T. (1997). "Metodologias para a reabilitação de aquíferos poluídos." Dissertação de Doutoramento em Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa publicada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil em Teses e Programas de Investigação LNEC, TPI 11, ISBN 972-49-1733-9.

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, Grounwater Work Group Brussels

LOPO MENDONÇA, J. (2006). "Delimitação de perímetros de protecção de furos de captação de água subterrânea pelo método de rastreio de partículas associado a modelos de fluxos em diferenças finitas." In: Revista Recursos Hídricos, Vol.27, Nº1,33-42, APRH, Lisboa,p10

MARQUES MOINANTE, M. (2002). "Delimitação de perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas. Estudo comparativo utilizando métodos analíticos e numéricos." Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa

MENDES, E. (2010). "Modelos GeoHidráulicos em meios fracturados de rochas graníticas - Caso de Estudo do Aquífero da Fonte da Fraga - Serra da Gardunha" Dissertação de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã

MENDES, E. (2006). "Perímetros de protecção de captação das águas subterrâneas para consumo humano em zonas de montanha. Caso de estudo da cidade da Covilhã" Dissertação de Mestrado. Universidade da Beira Interior, Covilhã, pp 7,8, 61, 64

MOINAMTE, M., CÁRCOMO, J, FERREIRA .(2004). "Delimitação de Perímetros de Protecção de captações de água subterrânea destinadas ao abastecimento público do concelho de Montemor-o-novo". In: CABRAL, J, FERREIRA, J, MONTENEGRO, S, COSTA, W. (2004) "Água subterrânea. Aquíferos Costeiros e Aluviões, Vulnerabilidade e Aproveitamento" Recife: ED Universitária da UFPE.pp.323,326.

NAVARRETE, C., MERINO, L.(1991). "Guía Metodológica para la Elaboración de Perímetros de Protección de Cattaciones de Aguas Subterráneas" Instituto Tecnológico GeoMineiro de Espanã, Primeira Edicion, Espanã,pp162,163

PARTIDÁRIO, M.R. (1999). "Introdução ao Ordenamento do Território", Universidade Aberta. Lisboa. p. 210

PFANNKUCH, H.O. (1991). "Application of Risk Asssment Methodology to Aquifer Determination and Wellhead Protection Zoning." In: " Risk and Reability in Water Resources and Eviromental Engineering", NATO/Advanced Study, Grécia, Porto Carras, 18 a 28 de Maio de 1991

PIMENTEL, N. (1994). "As formas de relevo e a sua origem". In: "Portugal Perfil Geográfico" Editorial Estampa, Lisboa, pp29,30

PLÁCIDO, E. (2007). “Qualidade da água mineral do Campo Geotérmico e Hidrotermal e São Pedro do Sul, Dissertação de Mestrado. Universidade da Beira Interior, Covilhã, p9-50

THORNTHWAITE, C.W., MATHER, J.R. (1955). “The water balance.” Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, p104.

TODD D.K. (1980). “Groundwater hydrology” John Wiley & Sons, New York, p.535

VALLEJO, L., ET AL. (2002). “Ingeniería Geológica” Pearson Educación, S.A, Madrid, p 2,5, 430,431,440

VILLANUEVA MARTINEZ, M., IGLESIAS LOPEZ, A.(1984). “Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo.” Instituto Tecnológico GeoMinero de Espanha.

Documentos Electrónicos

APRH. (2011). “Circulação da água nos meios Porosos, Fracturados e Cársicos”. [Consultado a 6 de Maio de 2011] Disponível na WWW:
http://aprh.pt/pdf/triptico_CEAS.pdf

CONSORZIO DHI ITÁLIA. (2011). “Modelação de software de elementos finitos- FEFLOW”. [Consultado a 12 de Abril de 2011]. Disponível na WWW:
<http://dhi-italia.it>

FERNANDES, J.(2009). “Tipos de aquíferos”. [Consultado a 15 de Dezembro de 2010] Disponível na WWW:
<http://bionaturalife.blogspot.com>

GREAT OLIVER GROUNDWATER VULNERABILITY. (2011). “Método Drastic”. [Consultado a 21 de Julho de 2011]. Disponível na WWW:
<http://frakturmedia.net/oswp/drastic/>

IGM.(2001). “Água Subterrânea: Conhecer para proteger e preservar”. [Consultado a 10 de Dezembro de 2010]. Disponível na WWW:
http://egeo.ineti.pt/divulgacao/materiais/guioes/agua_subterranea.pdf

IGM. (2001). “Diferentes origens da poluição de águas subterrâneas”. [Consultado a 10 de Dezembro de 2010]. Disponível na WWW:
http://egeo.ineti.pt/divulgacao/materiais/guioes/agua_subterranea.pdf

IGM. (2001). “Permeabilidade e impermeabilidade”. [Consultado a 10 de Dezembro de 2010]. Disponível na WWW:
http://egeo.ineti.pt/divulgacao/materiais/guioes/agua_subterranea.pdf

INAG-DSRH-DRSUB. (1999). “Corte Transversal do Perímetro de Protecção”. [Consultado a 2 de Dezembro de 2010]. Disponível na WWW:
<http://snirh.pt/snirh/actual/folhetos/perim.html>

INAG-DSRH-DRSUB. (1999). “Perímetros de Protecção”. [Consultado a 2 de Dezembro de 2010]. Disponível na WWW:
<http://snirh.pt/snirh/actual/folhetos/perim.html>

LNEG. (2011). “Léxico de termos hidrogeológicos”. [Consultado a 6 de Maio de 2011] Disponível na WWW:
http://e-geo.ineti.pt/bds/lexico_hidro/lexico.aspx?Termo=Zona%20n%E3o%20Saturada

MAGNO, C. (1999). “Perímetros de protecção de águas minerais naturais”. Preservação da Qualidade das Águas Minerais Naturais e Águas de Nascente. Instituto Geológico e Mineiro. [Consultado a 2 de Janeiro de 2011] Disponível na WWW:
http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edições_online/diversos/águas/capitulo4.htm

PORTAL DE ESTUDOS EM QUÍMICA. (2011). “Distribuição de água no planeta Terra”. [Consultado a 26 de Junho de 2011]. Disponível na WWW:
<http://profpc.com.br/%c3%81gua/%c3%81gua.41.jpg>

PROCESSING MODFLOW FOR WINDOWS. (2010). “Simulação da zona de concentração em SM-GO”. [Consultado a 12 de Janeiro de 2010] Disponível na WWW:
<http://pmwin.net/asmwin6.htm>

SNIRH.(2010). “Boletim de Precipitação”. [Consultado a 15 de Dezembro de 2010] Disponível na WWW:
<http://snirh.pt/index.php?idMain=1&dItem=1.1>

USGS.(2011). “Zona saturada e Zona não saturada”. [Consultado a 10 Julho de 2011] Disponível na WWW:
<http://ga.water.usgs.gov/edu/graphics/portuguese/wsgwstorgezones.gif>

Anexo

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, infra-estruturas 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 lixiviantes 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 acidental 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

1 — 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.

2 — 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 m³/dia ficam abrangidas pelo disposto no presente diploma para todas as zonas de protecção previstas e definidas nos termos do presente decreto-lei.

3 — 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.

7 — Nas zonas costeiras onde exista ou possa existir intrusão marinha, o perímetro de protecção inclui ainda zonas de protecção especiais para prevenir o avanço da cunha salina, 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 no número 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;
- l) 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 referirem 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 encontrarem 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.