



**Zélia Maria Costa Policarpo dos Santos
Laureano**

Mestrado em Engenharia e Gestão da Água

**METODOLOGIA PARA DELIMITAR
PERÍMETROS DE PROTECÇÃO DE
CAPTAÇÕES DE ÁGUA SUBTERRÂNEA**

**Aplicação ao Aquífero Mio-Pliocénico
do Tejo**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
e Gestão da Água

Orientador: Professora Doutora Maria Manuela Simões
Ribeiro - FCT

Co-orientador: Doutora Malva Andrea Mancuso - LNEC

Júri:

Presidente: Doutor António Pedro de Nobre Carmona Rodrigues

Arguente: Doutora Maria do Rosário de Carvalho

Vogal: Doutora Maria Manuela Machado Simões Ribeiro



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Janeiro 2012



**Zélia Maria Costa Policarpo dos Santos
Laureano**

Mestrado em Engenharia e Gestão da Água

**METODOLOGIA PARA DELIMITAR
PERÍMETROS DE PROTECÇÃO DE
CAPTAÇÕES DE ÁGUA SUBTERRÂNEA**

**Aplicação ao Aquífero Mio-Pliocénico
do Tejo**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
e Gestão da Água

Orientador: Professora Doutora Maria Manuela Simões
Ribeiro - FCT

Co-orientador: Doutora Malva Andrea Mancuso - LNEC

Júri:

Presidente: Doutor António Pedro de Nobre Carmona Rodrigues

Arguente: Doutora Maria do Rosário de Carvalho

Vogal: Doutora Maria Manuela Machado Simões Ribeiro



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Janeiro 2012

COPYRIGHT

Metodologias para Delimitar Perímetros de Protecção de Água Subterrânea –
Aplicação ao Aquífero do Mio-Pliocénico do Tejo - Copyright © em nome de Zélia
Maria Costa Policarpo dos Santos Laureano, aluna da FCT/UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e à Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de formato digital, ou de qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos que apresento de seguida, dirigem-se a pessoas que de algum modo contribuíram para que fosse possível alcançar os objectivos que me propus com esta dissertação. Algumas destas pessoas colaboraram directamente neste trabalho através de reuniões realizadas na FCT e no LNEC, enquanto outras contribuíram simplesmente com a sua boa vontade, amizade e afecto. Assim sendo, os meus agradecimentos são para:

A Professora Maria Manuela Simões Ribeiro do Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, que como orientadora desta dissertação além de me transmitir os conhecimentos necessários para efectuar este trabalho de investigação, me facultou e orientou em relação à recolha e gestão de toda a informação disponível sobre o objecto da pesquisa. Quero também agradecer a sua pronta disponibilidade, amizade e incentivo que sempre me deu desde que a conheci como professora da disciplina de Hidrogeologia do Mestrado de Engenharia e Gestão da Água e em especial ao longo destes últimos meses;

À Doutora Malva Mancuso do Departamento de Geologia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil que como co-orientadora da presente dissertação me forneceu toda a informação e apoio em relação ao método numérico utilizado no trabalho e sempre se mostrou disponível para esclarecer as minhas duvidas;

Para toda a minha família que sempre me apoiou durante a realização do Mestrado, em especial o meu marido, Fernando Laureano, as minhas filhas, Inês e Joana, os meus pais e sogros.

Quero ainda agradecer a todos os professores do Mestrado em Engenharia e Gestão da Água de 2009/2011, pela amizade e paciência e pelos conhecimentos que me transmitiram.

RESUMO

Como consequência dos modelos de desenvolvimento das sociedades contemporâneas, são cada vez mais perceptíveis as alterações dos regimes hidrológicos, a contaminação das águas subterrâneas e a necessidade de definir estratégias de protecção dos recursos hídricos. Esta protecção, encarada na perspectiva preventiva, no caso dos aquíferos, engloba a delimitação de perímetros de protecção.

Com a delimitação de perímetros de protecção, pretende-se diminuir o risco de contaminação da água dos aquíferos e, no caso de um evento poluidor, que a água chegue às captações com concentrações consideradas aceitáveis e/ou permita tomar medidas atempadas de remediação.

No presente trabalho é feita uma síntese e abordagem sobre as metodologias propostas por outros autores para delimitar perímetros de protecção. Apresenta-se também um caso de estudo sobre a definição do perímetro de protecção de uma captação de água subterrânea para abastecimento público localizada na zona baixa, no limite do concelho de Almada, mais precisamente na freguesia da Sobreira de Caparica, distrito de Setúbal. Esta captação encontra-se a captar o aquífero confinado mais superficial do Sistema Aquífero do Mio-Pliocénico do Tejo (entre os 70 m e os 160 m). Esta captação bem como as cerca de 60 captações do mesmo tipo que se estendem numa área aproximada de 27 ha, são do tipo furos verticais em meio poroso, com profundidades que variam entre os 150 e 450 m, muito comuns nesta região em especial na zona da Baixa e Santa Marta de Corroios no concelho do Seixal.

Assim, neste trabalho é sugerida uma metodologia a seguir em meio poroso que resulta de uma conjugação de três métodos ou aspectos: 1) Métodos analíticos (Wissling); 2) Raio fixo calculado adaptado do Decreto-Lei nº.382/99 de 22 de Setembro; 3) Métodos numéricos.

PALAVRAS-CHAVE – Métodos geométricos, analíticos, numéricos; Perímetros de protecção; Captações de água subterrânea; Abastecimento público; Sistema aquífero do Tejo; Sobreira, Almada.

ABSTRACT

As a result of the development models of contemporary societies, are increasingly noticeable changes in hydrological regimes, contamination of groundwater and the need to define strategies to protect water resources. This protection, seen in the preventive approach in the case of aquifers, includes the delineation of protection perimeters.

With the delimitation of protection perimeters, it is intended to reduce the risk of water contamination of aquifers and in the case of an event polluter, which captures the water reaches the acceptable concentrations and / or can take timely remedial measures.

In this work we made an approach to the synthesis and methodologies proposed by other authors to define perimeters of protection. We also present a case study on the definition of a perimeter of protection of groundwater abstraction for public water supply located in the downtown area, within the limits of the municipality of Almada, more precisely in the parish of Sobreda de Caparica, Setúbal district. This capture is to capture the most superficial of the confined aquifer Aquifer System of the Mio-Pliocene Tagus (between 70 m and 160 m). This collection and the 60 catchments of the same type in an area extending approximately 27 ha, are of type vertical holes in a porous medium, with depths ranging between 150 and 450 m, very common in this region especially in the area Lower and Santa Marta in the county of Corroios Seixal.

Thus, this work is a suggested methodology to be followed in porous media that results from a combination of methods or three aspects: 1) analytical methods (Wissling), 2) calculated fixed radius adapted from Decree-Law No. .382/99 of 22 September: 3) numerical methods.

KEYWORDS - Geometric methods, analytical, numerical, Perimeter protection, groundwater extraction; Supply Public aquifer system of the Tagus; Sobreda, Almada.

ÍNDICE

CAPÍTULO –1.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO –2.....	5
OBJECTIVOS.....	5
CAPÍTULO –3.....	7
ENQUADRAMENTO LEGAL.....	7
3.1 - DISPOSIÇÕES GERAIS.....	7
3.2 - OBJECTIVOS PSRA AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	8
3.3 - CARACTERIZAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	8
3.4 – PRESSÕES E IMPACTOS NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	9
3.5 – PROTECÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	10
3.6 – QUADRO COMUNITÁRIO E INTERNACIONAL.....	19
CAPÍTULO – 4.....	23
VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS E CAPTAÇÕES.....	23
CAPÍTULO – 5.....	29
PROTECÇÃO DE CAPTAÇÕES DE ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	29
5.1 – CRITÉRIOS.....	29
5.2 – MÉTODOS.....	34
5.2.1 – MÉTODOS GEOMÉTRICOS.....	34
5.2.1.1 – MÉTODO DO RAO FIXO ARBITRÁRIO.....	34
5.2.2 – MÉTODOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS SIMPLIFICADOS.....	35
5.2.2.1 – MÉTODOS BASEADOS NA LEI DE DARCY.....	36
5.2.2.2 – MÉTODO DO RAO FIXO CLALCULADO.....	37
5.2.2.3 – MÉTODO DO FLUXO ENTRE AQUÍFEROS.....	41
5.2.2.4 – MÉTODO DA EQUAÇÃO DO FLUXO UNIFORME.....	42

5.2.2.5 – MÉTODO DA EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO DE THIEM.....	43
5.2.2.6 – MÉTODO DA EQUAÇÃO DE HOFFMAN E LILICH.....	44
5.2.2.7 – MÉTODO DE WYSSLING.....	45
5.2.2.8 – MÉTODO DAS FORMAS VARIADAS SIMPLIFICADAS.....	48
5.2.2.9 – MÉTODO DE KRIJGSMAN E LOBO FERREIRA.....	50
5.2.3 – MÉTODOS GRÁFICOS.....	52
5.2.3.1 – MÉTODO DE ALBINET.....	52
5.2.3.2 – MÉTODO DE JACOBS E BEAR.....	55
5.2.3.3 – MÉTODO DE SAUTY PARA UM ÚNICO POÇO.....	56
5.2.3.4 – MÉTODO DE SAUTY PARA UMA BATERIA DE POÇOS EM LINHA.....	62
5.2.3.5 – MÉTODO DOS NOMOGRAMAS DE VAN WEAGENINGH E VAN DUIJUNBODEN.....	63
5.2.4 – MÉTODOS NUMÉRICOS.....	66
5.2.4.1 – MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS E ELEMENTOS FINITOS.....	67
5.2.4.2 – MÉTODO DO RASTREIO DE PARTÍCULAS.....	67
5.2.4.3 – MÉTODO DA SOBREPOSIÇÃO DOS GRADIENTES.....	68
5.2.4.3 – MÉTODO DE FLUXO E TRANSPORTE DE MASSA.....	70
5.2.5 – OUTROS MÉTODOS.....	75
5.2.5.1 – MÉTODO DE HORSLEY.....	75
5.2.5.2 – UTILIZAÇÃO DE TRAÇADORES.....	77
5.3 – ESCOLHA DO CRITÉRIO E MÉTODO A ADOPTAR.....	78
5.3.1 – CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS.....	84
5.3.2 – CONSIDERAÇÕES ECONÓMICAS.....	95
5.3.2.1 – CUSTO DA APLICAÇÃO DOS DIFERENTES MÉTODOS.....	95
5.3.2.2 – IMPACTO SOCIOECONÓMICO NA APLICAÇÃO DO PERÍMETRO DE PROTECÇÃO.....	97
CAPÍTULO – 6.....	101
CASO DE ESTUDO.....	101
6.1 – CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA E AMBIENTAL.....	101
6.2 – HIDROCLIMATOLOGIA.....	115

6.3 – CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA.....	118
6.4 – BACIA DE CORROIOS	124
6.5 – FUNDAMENTAÇÃO PARA A APLICAÇÃO DOS MÉTODOS SELECIONADOS	126
6.6 – MODELO DE CIRCULAÇÃO SUBTERRÂNEA NA ZONA DA CAPTAÇÃO.....	127
6.7 – ETAPAS NECESSÁRIAS PARA A APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	130
6.7.1 – CARACTERIZAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO.....	132
6.7.2 – PARÂMETROS HIDRÁULICOS.....	132
6.8 – DEFINIÇÃO DOS PERÍMETROS DE PROTECÇÃO.....	134
6.9 – CALIBRAGEM DO MÉTODO APLICADO.....	139
6.10 – IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA NO TERRENO.....	142
6.11 – PERÍMETROS DE PROTECÇÃO NA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS E PLANIFICAÇÃO DO TERRITÓRIO.....	143
CAPÍTULO – 7.....	153
CONCLUSÕES.....	153
CAPÍTULO – 8.....	155
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	155
BIBLIOGRAFIA.....	159

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Países que apresentam legislação específica sobre delimitação de perímetros de protecção.....	21
Figura 5.1 – Área de influência e área de recarga (alimentação) de um aquífero sem gradiente hidráulico em regime estacionário e com precipitações elevadas.....	31
Figura 5.2 – Área de influência e área de recarga (alimentação) de um aquífero com gradiente hidráulico em regime estacionário.....	32
Figura 5.3 – Definição do perímetro de protecção utilizando o método do raio fixo.....	38
Figura 5.4 – Definição do perímetro de protecção utilizando a equação de fluxo uniforme.....	43
Figura 5.5 – Determinação das isócronas por iteração.....	45
Figura 5.6 – Determinação de isócronas - Método de Wyssling.....	46
Figura 5.7 – Esquema de uma bombagem em meio poroso.....	47
Figura 5.8 – Exemplo de utilização de formas variáveis simplificadas.....	49
Figura 5.9 – Curvas de igual piezometria.....	53
Figura 5.10 – Exemplo de curvas de distância piezométrica para um aquífero livre e caudal de bombagem de $200\text{m}^3/\text{h}$	54
Figura 5.11 – Determinação da zona de chamada de uma captação.....	54
Figura 5.12 – Linhas de corrente em torno da captação.....	56
Figura 5.13 – Alimentação de uma bombagem nas proximidades de um curso de água.....	57
Figura 5.14 – Diagrama de fluxos.....	58
Figura 5.15 – Taxa de água bombeada proveniente do curso de água.....	58
Figura 5.16 – Influência do fluxo regional sobre o tempo de chegada em função de Q e de r	59
Figura 5.17 – Captação alimentada lateralmente por um rio.....	60
Figura 5.18 – Evolução do volume infiltrado na ausência de assoreamento ($A=0$).....	61
Figura 5.19 – Proporção de caudal extraído, proveniente do rio em regime.....	62
Figura 5.20 – Bateria de furos em linha.....	63
Figura 5.21 – Exemplo de aplicação dos nomogramas de Van Weagening e Van.....	65
Figura 5.22 – Principais etapas da utilização de um modelo matemático.....	72

Figura 5.23 – Aplicação de um modelo de fluxo e qualidade para a determinação de um perímetro de protecção em Troyes e em Mogne (França).....	74
Figura 5.24 – Determinação da divisória do fluxo da captação. Águas subterrâneas com o mesmo sentido do fluxo. Caso de aplicação de Massachusetts.....	77
Figura 5.25 – Área protegida mediante a aplicação de diferentes métodos.....	87
Figura 5.26 – Análise comparativa dos diferentes métodos para distintos tempos de trânsito em várias cidades.....	89
Figura 5.27 – Organigrama para selecção de métodos e modelos para a protecção de recursos hídricos subterrâneos.....	99
Figura 6.1 – Mapa da Península de Setúbal e área de localização da captação seleccionada para o estudo.....	101
Figura 6.2 – Perfil da captação FR1.....	103
Figura 6.3 – Planta de localização dos furos de captação de Almada e Seixal.....	104
Figura 6.4 – Planta de localização da captação FR1.....	105
Figura 6.5 - Classificação de “zonas sensíveis” e “áreas de influencia”	106
Figura 6.6 - Áreas Classificadas como Área de Paisagem Protegida no Concelho de Almada...	107
Figura 6.7 – Modelo Digital do Terreno do Concelho de Almada.....	108
Figura 6.8 - Cartografia geológica do Concelho de Almada.....	109
Figura 6.9 - Unidades morfoestruturais da Península Ibérica.....	110
Figura 6.10 – Intensidade sísmica (escala internacional), para o período 1901-1972.....	111
Figura 6.11 – Rede hidrográfica da Península de Setúbal.....	112
Figura 6.12 - Carta de Solos, escala original 1:50 000, escala aproximada 1:120 000.....	113
Figura 6.13 – Carta de uso do solo.....	115
Figura 6.14 - Temperatura média do ar.....	116
Figura 6.15 – Mapa de precipitação total anual.....	117
Figura 6.16 – Unidade hidrogeológica morfo-estrutural da Bacia Terciária do Tejo-Sado.....	119
Figura 6.17 – Recarga de águas subterrâneas por infiltração da água da chuva.....	120
Figura 6.18 – Modelo hipotético do escoamento do sistema aquífero do Baixo Tejo, Margem Esquerda.....	121

Figura 6.19 – Isopiezas dos níveis hidrostáticos para os anos indicados. Em 2003, indica-se a tendência global do fluxo subterrâneo.....	123
Figura 6.20 – Modelo hipotético do escoamento subterrâneo do sistema aquífero em estudo.....	125
Figura 6.21 – Modelo hipotético do escoamento do sistema aquífero confinado da área em estudo.....	129
Figura 6.22 – Planta com a definição do perímetro de protecção da captação FR1 pelos vários métodos.....	136
Figura 6.23 – Planta com a definição do perímetro de protecção alargado da captação FR1 efectuada a partir do método numérico de fluxo e transporte de partículas com base na velocidade da água.....	137
Figura 6.24 – Planta com a definição do perímetro de protecção alargado da captação FR1, efectuada a partir do método numérico de fluxo e transporte de partículas com base na velocidade da água.....	138
Figura 6.25 – Planta com indicação do perímetro de protecção alargado das captações FR1 e FR2($Q=553\text{m}^3/\text{dia}$), para 3500 dias de percurso de partículas (MODPATH).....	141
Figura 6.26 – Processo para a determinação dos requisitos de desempenho.....	145
Figura 6.27 – Processo de investigação.....	146
Figura 6.28 – Processo de avaliação.....	147
Figura 6.29 – Processo de elaboração do plano de acção.....	148
Figura 6.30 – Processo de implementação do plano de acção.....	149
Figura 6.31 – Fluxograma da metodologia de implementação de um plano de acção de poluição ou ameaça de poluição das águas subterrâneas.....	150

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1- Perímetros de Protecção na área de ARH Tejo.....	19
Tabela 4.1 - Classes de vulnerabilidade do índice DRASTIC.....	27
Tabela 5.1 – Relação entre os critérios que podem empregar-se na delimitação dos perímetros de protecção e os processos físicos que controlam.....	29
Tabela 5.2 – Zonas de protecção para os vários tipos de aquífero.....	40
Tabela 5.3 - Valorização dos critérios utilizados na delimitação dos perímetros de protecção em função de considerações técnicas.....	79
Tabela 5.4 – Critério empregue nos diferentes métodos de delimitação de perímetros de protecção.....	81 e 82
Tabela 5.5 – Características dos dois tipos básicos de aquíferos carbonatados.....	83
Tabela 5.6 – Selecção do método com base em considerações técnicas.....	85
Tabela 5.7 – Análise comparativa dos perímetros de protecção obtidos através de diferentes métodos.....	86
Tabela 5.8 – Dados necessários para poder aplicar os diferentes métodos existentes para a determinação dos perímetros de protecção. Síntese das metodologias de delimitação de perímetros de protecção.....	92 e 93
Tabela 5.9 - Custo da determinação do perímetro de protecção segundo os diferentes métodos.....	95
Tabela 5.10 – Potenciais derrapagens nos custos na determinação do perímetro de protecção.....	97
Tabela 6.1 – Áreas das sub-bacias que afluem à bacia de Corroios.....	122
Tabela 6.2 – Recarga anual média, taxa de recarga e volume anual médio que pode ser extraído.....	124
Tabela 6.3 - Características das captações em estudo.....	131
Tabela 6.4 - Calculo da Vulnerabilidade do aquífero através do índice DRASTIC.....	132
Tabela 6.5 – Parâmetros hidráulicos apresentados por Almeida <i>et al</i> (2000) calculados a partir de furos submetidos a ensaio de bombagem.....	133
Tabela 6.6 – Parâmetros hidráulicos apresentados pela EPAL (1996) calculados a partir de furos de captação submetidos a ensaios de bombagem.....	133
Tabela 6.7 – Perímetros de protecção de três captações que se encontram a captar no aquífero confinado.....	134

Tabela 6.8 – Comparação dos perímetros de protecção de três captações do caso de estudo.....	140
Tabela 6.9 - Relação entre os objectivos e os requisitos funcionais.....	144
Tabela 6.10 – Usos múltiplos oferecidos pelas soluções de controlo na origem.....	151

CAPÍTULO -1

INTRODUÇÃO

Tendo como preocupação a gestão sustentável da água, um recurso imprescindível ao Homem e aos ecossistemas da Terra, numa época em que a evolução negativa da qualidade suscita a apreensão de todos, surgem em quase todo o mundo medidas de protecção das massas de água e das captações que as exploram. Através de leis, são os Estados e os utilizadores obrigados a restrições no uso do território com o fim último de preservarem a água subterrânea de eventuais contaminações. A forma mais expedita de se protegerem águas destinadas ao abastecimento público surge com a obrigatoriedade de se guardarem áreas em redor das captações onde se restringem actividades comprometedoras da qualidade e quantidade. Neste princípio baseia-se toda a problemática em torno dos perímetros de protecção de captações de água subterrânea para abastecimento público e de exploração de águas termais e minerais. A delimitação de zonas de protecção das águas subterrâneas envolve uma gama de conceitos e de princípios; todos têm como objectivo limitar as actividades poluentes em torno do ponto de extracção a fim de impedir que os contaminantes atinjam a água que se pretende captar. No entanto, a protecção mais eficaz das massas de água subterrânea é a que impede a implantação de qualquer actividade e/ou instalação fabril ou agro-pecuária, potencialmente poluente, na área de recarga do aquífero que alimenta a captação ou na zona de chamada de água à captação quando em bombeamento.

Na generalidade podem ser considerados dois tipos de estratégia na protecção da água subterrânea. Ou efectuando uma protecção geral do aquífero, identificando quais as suas áreas mais susceptíveis de forma a promover um controle regional do processo de uso do solo em toda a sua extensão. Ou efectuando uma protecção pontual, para cada uma das captações de água subterrânea, em especial às que se destinam ao abastecimento público. Neste caso, a área mais vulnerável é aquela que representa a área de recarga da captação. Toda a água contida na área de recarga fluirá até à captação sendo denominada de *Zona de Contribuição (ZC)* ou *Zona de Captura*, onde se devem adoptar medidas mais rígidas de controlo das actividades humanas para garantir a protecção da

qualidade da água destinada ao abastecimento. Como, em geral, a *Zona de Contribuição* abrange uma grande extensão, são definidas áreas menores contidas dentro da ZC denominadas de perímetros ou áreas de protecção de poços e captações, de forma a viabilizar medidas de protecção mais rígidas quanto mais próximo se encontrar do ponto da captação (Krijgman, 2001).

A protecção de captações de água subterrânea para abastecimento público ou de águas minerais naturais é uma prática que tem vindo a acontecer em diversas partes do mundo. Em Portugal surge pela primeira vez, na década de 90 do século passado, associada às águas minerais. No entanto, alguns países do mundo não adoptam políticas de protecção das águas subterrâneas em relação à poluição e à sobreexploração, uma vez que o processo envolve geralmente o controlo dos usos e a regulamentação das actividades causadoras de poluição. Muitos outros factores, como a falta de adequada informação hidrogeológica sobre a área, a escassez de recursos hídricos, a desajustada localização das cidades e a limitada existência de profissionais com formação compatível com os problemas, suscitam sentimentos de generalizada insegurança sobre a escolha e a execução dos métodos disponíveis para delimitar perímetros de protecção, principalmente nos países pouco desenvolvidos, uma vez que estes devem ser definidos com base no funcionamento hidrogeológico do sistema. Por norma a protecção obriga à delimitação de três zonas normalmente designadas por i) zona de protecção imediata, ii) zona de protecção intermédia, iii) e zona de protecção alargada. Na primeira, imediata à captação é interdita toda e qualquer actividade. Na intermédia, de extensão variável, são interditas ou condicionadas as actividades e as instalações susceptíveis de poluírem, alterarem a direcção do fluxo ou modificarem a infiltração, em função do risco de poluição e da natureza dos terrenos envolvidos. Por último, a zona de protecção alargada destina-se a proteger as águas de poluentes persistentes, onde as actividades e instalações são interditas ou condicionadas em função do risco de poluição.

Para além destas zonas, estão igualmente definidos os casos específicos de zonas especiais, tais como, as zonas de conexão hidráulica directa e as zonas costeiras susceptíveis de intrusão marinha. Também pode haver excepções, como é o caso de captações em maciços calcários, onde as três zonas de protecção são insuficientes. Por se tratar de sistemas com circulação muito rápida e elevada conexão hidráulica, é criada uma zona de protecção especial.

Apesar de melhor protegidas, em relação às superficiais, as águas subterrâneas, quando contaminadas, tendem a recuperar a qualidade muito mais lentamente e de forma mais dispendiosa. Além disto, quando um aquífero está contaminado é muito difícil recuperar as condições iniciais, mesmo que a fonte poluente se encontre desactivada. Nestes casos, a poluição só é detectada muito tempo após o início do processo (Moinante, 2003).

Os métodos que permitem estabelecer os perímetros de protecção de captações de água subterrânea são diversos. A sua escolha dependerá do tipo de aquífero, do critério delimitador e dos dados disponíveis. Ainda assim, deverão fundamentar-se em estudos que permitam caracterizar os aquíferos e avaliar o grau de vulnerabilidade e o risco à poluição. A capacidade de atenuação do solo e do aquífero, o rebaixamento e as zonas de influência da captação; as divisórias de água superficial e subterrânea e o tempo de trânsito da água subterrânea e dos poluentes em solução são aspectos a ter em conta no processo de delimitação das captações.

Segundo Cruz (1997), os perímetros de protecção devem corresponder à área necessária e suficiente para a protecção de um aquífero e dos meios de exploração. As zonas de protecção (imediate, intermédia e alargada) não devem ter dimensões tão pequenas que percam a eficácia, nem exageradamente grandes. A exagerada amálgama de servidões administrativas tem consequências desastrosas no desenvolvimento e consequentemente na economia. Não esquecer que o equilíbrio adequado nas dimensões dos perímetros de protecção será tanto maior quanto mais completo for o conhecimento científico.

Aspectos técnicos e científicos a serem utilizados na definição de perímetros de protecção têm sido apresentados e sugeridos por diversos autores de acordo com os objectivos pretendidos e com as condições hidrogeológicas em causa ITGE - Instituto Tecnológico GeoMineiro de Espanha (1991), Lopo Mendonça (2009), Lobo Ferreira *et al.* (1995), Cruz (1997), INAG - Instituto da Água (2000), Krijgsman e Lobo Ferreira (2001), Moinante (2003), Naverrete e Garcia (2003), Condesso de Melo (2004), Moinante e Lobo Ferreira (2004), Ferreira Gomes (2002, 2006). Ferreira Gomes *et al.* (1997), Ferreira Gomes *et al.* (2001).

CAPÍTULO – 2

OBJECTIVOS

O principal objectivo deste trabalho é compatibilizar a escolha da metodologia a adoptar na delimitação de perímetros de captações para abastecimento público em aquífero poroso e localizadas em área urbana densamente povoada, onde o conflito de interesses sobre a ocupação e gestão do território é colocado muitas vezes à margem das condições básicas necessárias à preservação dos sistemas hídricos subterrâneos. Muitas vezes porque não se vêem ou porque se desconhece o seu funcionamento hidráulico, razões pelas quais muitas acções destrutivas são permitidas e autorizadas. Para a sustentabilidade do planeta devem os recursos ser explorados e preservados de acções externas que conduzam à diminuição da qualidade e quantidade da água. Para o efeito, uma das possíveis medidas consiste na protecção de captações e sistemas captados através de acções preventivas limitadoras de actividades em áreas delimitadas por perímetros a salvaguardar ou desenhando áreas de vulnerabilidade à poluição.

Não se pretende com este trabalho a obtenção de um método infalível, mas sim uma dissertação sobre o assunto, que contribua para a clarificação de algumas ideias e auxilie na tomada de decisões, com base em conhecimento científico, tecnológico e bom senso. A procura das melhores soluções beneficia tanto as actuais como as futuras gerações e justifica-se com acuidade num quadro de escassez progressiva da água.

Todos os perigos conhecidos relacionados com a contaminação, salinização, microrganismos e outros podem ser minimizados e controlados os efeitos através da adopção dos mais variados métodos, sejam ou não baseados em aspectos físicos ou químicos.

A metodologia proposta pretende ser alargada ao entendimento e monitorização do sistema aquífero submetido às várias solicitações, a fim de antecipar o seu comportamento e com isso otimizar a gestão. A finalidade é recorrer ao processamento automático de um conjunto de informação geográfica e analítica, obtida através dos processos administrativos, institucionais ou outros disponíveis. Especificamente, com este trabalho, pretende-se:

- 1º Elaborar numa metodologia piloto bem definida, que permita o armazenamento, numa base de dados operacional, toda a informação espacial e alfanumérica referente ao comportamento hidráulico do aquífero em articulação com as restantes condicionantes físicas do meio envolvente;
- 2º Desenvolver uma metodologia que possibilite a avaliação automática do comportamento do aquífero às várias solicitações (captações), em tempo real;
- 3º Contribuir para a clarificação dos limites de recarga de exploração do aquífero, face à legislação em vigor.
- 4º Organizar e sistematizar as etapas iniciais da metodologia de monitorização integrada do aquífero que contribua para a sua exploração sustentável.
- 5º Estruturar um SIG acessível na Internet, vulgo WebSIG, para a disponibilização interna das entidades gestoras, de toda a informação referente aos postos de monitorização na 1ª Fase, quer às captações de água em tempo real, numa 2ª Fase, nomeadamente as captações intermunicipais que se encontram a captar no mesmo raio de protecção.

CAPÍTULO - 3

ENQUADRAMENTO LEGAL

3.1-DISPOSIÇÕES GERAIS

O número e a dimensão das zonas de protecção e os critérios delimitadores dos perímetros são variáveis de país para país (ITGE - Instituto Tecnológico GeoMineiro de Espanha, 1991; EPA - Environmental Protection Agency, 1994; Marques, 2002). A configuração mais frequente engloba três zonas, definidas com base no tempo de propagação ou de trânsito dos contaminantes no aquífero.

Na União Europeia, a Directiva Quadro da Água (Directiva nº.2000/60/CE) responsabiliza os estados membros pelo estado quantitativo e qualitativo dos seus recursos hídricos, exigindo a identificação e a protecção das massas de água destinadas à captação de água para o consumo humano. Esta Directiva é transposta para a lei portuguesa através da Lei da Água (Lei nº.58/2005) que confere o enquadramento legal para protecção de captações para abastecimento público.

Os princípios orientadores para a delimitação de perímetros de protecção para as águas minerais e de nascente foram implementados em Portugal na década de 90 com os decretos-lei 84/90, 86/90 e 90/90. Só depois, com o decreto-lei n.º 382/99, ficam definidas as normas e os critérios para a delimitação de perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público. Este, segundo o Artº.1º, aplica-se a captações que abastecem aglomerados populacionais com mais de 500 habitantes ou cujo caudal de exploração seja superior a 100m³/dia. Contempla a definição de três zonas de protecção designadas por zonas imediata intermédia e alargada, com base nos critérios especificados no Artº.3º.

São vários os métodos que permitem delimitar perímetros de protecção; a sua escolha depende dos dados existentes, do critério delimitador e das características do aquífero, (Mendonça, 1993).

3.2.- OBJECTIVOS PARA AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A Lei da Água, através do Artº.47º define os objectivos para as águas subterrâneas. Consistem na aplicação de medidas destinadas a evitar ou limitar a descarga de poluentes nas águas subterrâneas e na prevenção da deterioração do estado de todas as massas de água. O bom estado das águas subterrâneas deverá ser alcançado pela implementação de acções que permitam:

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

Fica proibida a descarga directa de poluentes nas águas subterrâneas, à excepção de descargas que não comprometam o cumprimento dos objectivos específicos estabelecidos na Lei da Água, que podem ser autorizadas nas condições definidas no decreto-lei nº.77/2006.

3.3.- CARACTERIZAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Apenas na complementação à Lei da Água, através do decreto-lei nº77/2006, de 30 de Março é estabelecido através do seu Anexo I, parte II, a caracterização das águas subterrâneas, que compreende uma caracterização inicial, tendo em conta a localização e os limites das massas de água subterrâneas e as pressões a que essas massas de águas podem estar sujeitas, por exemplo, fontes difusas e fontes tóxicas de poluição, captação e recarga artificial. São também consideradas na caracterização inicial, as características gerais dos estratos geológicos que cobrem a área de drenagem que contribui directamente para a recarga dos aquíferos e também as massas de água subterrâneas que se encontram directamente associadas a ecossistemas aquáticos superficiais ou ecossistemas terrestres dependentes destas. Obriga à caracterização mais aprofundada

das massas ou grupos de massas de águas subterrâneas, que tenham sido consideradas em situação de risco a fim de permitir uma avaliação mais precisa da importância desse risco e consequente identificação das medidas necessárias, nos termos do Artº30º da Lei da Água. Esta caracterização inclui informações relevantes sobre o impacte das actividades humanas, as características geológicas e hidrogeológicas, incluindo a extensão e o tipo das unidades geológicas e a condutividade hidráulica, a porosidade e o confinamento. E ainda a caracterização dos solos e depósitos superficiais na área de drenagem que contribui para a recarga, nomeadamente a espessura, a porosidade, a condutividade hidráulica e as propriedades de absorção desses solos e depósitos; as características da estratificação das águas no interior da massa de água; o inventário dos sistemas superficiais associados, incluindo ecossistemas terrestres e massas de água superficiais, com as quais esta esteja directamente relacionada; estimativas das direcções e caudais de transferência de águas entre massas de água e os sistemas de água superficiais associados; dados suficientes para calcular a taxa de recarga global média anual a longo prazo e a caracterização da componente química das águas, incluindo a especificação do contributo da actividade humana.

3.4.- PRESSÕES E IMPACTOS NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

No anexo III do decreto-lei nº77/2006, de 30 de Março, é ainda definida a avaliação que se pretende das pressões sobre as águas subterrâneas e respectivo impacte, apenas para as águas transfronteiriças ou para as quais, uma vez efectuada a caracterização inicial prevista no anexo I, se verifique que se encontrem em risco de não cumprirem os seus objectivos ambientais. Nestes caso será necessário ainda, recolher a seguinte informação: localização dos pontos da massa de águas subterrâneas onde seja realizada a captação de água, que forneçam em média mais de 10m³/dia ou que abasteçam mais de 50 pessoas; as taxas médias anuais de captação a partir desses pontos; a composição química da água captada; a localização dos pontos da massa de água subterrânea nos quais é directamente descarregada água; as taxas de descarga nesses pontos; a composição química das águas descarregadas na massa de água subterrânea; o ordenamento do território na área ou áreas de drenagem a partir das quais a massa de

água recebe a sua recarga, incluindo poluentes e alterações antropogénicas das características de recarga, nomeadamente desvios das águas da chuva das linhas de escoamento por meio de aterros, recarga artificial, diques ou drenagem.

3.5.- PROTECÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Anteriormente à Lei da Água já tinha sido legislado, através do decreto-lei nº.382/99 de 22 de Setembro, um regime preventivo que assegurasse a protecção das águas subterrâneas através da instituição de perímetros de protecção das águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público. Consistia na definição de áreas, na vizinhança das captações, onde se estabeleciam restrições de utilidade pública ao uso e transformação do solo, em função das características inerentes às formações geológicas que armazenam as águas subterrâneas captadas e os caudais extraídos, como forma de salvaguardar a protecção da qualidade dessas águas subterrâneas.

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

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

Em suma, a delimitação de perímetros de protecção é realizada recorrendo a métodos hidrogeológicos apropriados que tenham em conta os caudais de exploração, as condições da captação e as características do sistema aquífero explorado. A fixação dos caudais de exploração e o dimensionamento das captações de águas subterrâneas

destinadas ao abastecimento público têm de 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 áreas de protecção e restrições excessivas se tal não se traduzir em benefício efectivo das águas subterrâneas. Pelo que se tem de exigir que os perímetros de protecção sejam baseados em estudos hidrogeológicos suficientemente rigorosos para evidenciarem a eficácia das medidas de protecção impostas.

Por outro lado, não fará sentido localizar captações em áreas onde as pressões sobre o uso do solo são de tal maneira elevadas, de modo que os custos de oportunidade das restrições impostas se traduzam em custos não razoáveis da água na origem, 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 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 assegurem a efectiva protecção das águas subterrâneas destinadas ao consumo humano.

No entanto, passada mais de uma década sobre a publicação desta legislação, é possível agora utilizar meios informáticos mais desenvolvidos e sofisticados. Consideravelmente mais acessíveis, que permitem o aperfeiçoamento dos métodos utilizados. Métodos mais precisos permitem a criação de rotinas e procedimentos de forma automática tornado a abordagem mais agradável e abrangente.

Apesar do decreto-lei nº.382/99 se aplicar às captações de água subterrânea destinada ao consumo humano de aglomerados populacionais com mais de 500 habitantes ou com caudal de exploração superior a 100m³/dia, todas as captações de água subterrânea destinadas ao abastecimento público são obrigadas à protecção definida zona de protecção imediata.

O perímetro de protecção é a área contígua à captação na qual se interditam ou condicionam as instalações e as actividades susceptíveis de poluírem as águas subterrâneas. Engloba as seguintes zonas:

- **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;
- **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;
- **Zona de protecção alargada** – área da superfície do terreno contígua exterior à zona de protecção intermédia, destinada a proteger as águas subterrâneas de poluentes persistentes, tais como compostos orgânicos, substâncias radioactivas, metais pesados, hidrocarbonetos e nitratos, onde as actividades e instalações são interditas ou condicionadas em função do risco de poluição das águas, tendo em atenção a natureza dos terrenos atravessados, a natureza e a quantidade de poluentes, bem como o modo de emissão de poluentes.

Estabelece ainda, o decreto-lei nº.382/99, que os perímetros de protecção englobam as diferentes zonas atrás referidas desenhadas com base em critérios geológicos, hidrogeológicos e económicos, estabelecidos em função das características do aquífero ou sistema aquífero onde se localiza a captação, as condições técnicas da captação e os caudais de exploração, mediante a realização de estudos hidrogeológicos e económicos.

Salvaguardando as situações em que não seja possível realizar os referidos estudos, mediante parecer favorável dos organismos da tutela, existe a possibilidade de efectuar a determinação das zonas de protecção através de recurso ao método do raio fixo, calculado de acordo com o anexo ao decreto-lei ou outro considerado mais adequado.

Deixa em aberto a exclusão das zonas de protecção intermédia e alargada se as captações se situarem em sistemas aquíferos com risco reduzido de poluição demonstrado por estudos hidrológicos.

Quando se justificar, nomeadamente em zonas com 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.

Em aquíferos costeiros com risco de intrusão marinha, o perímetro de protecção inclui também zonas de protecção especiais como prevenção ao avanço da cunha salina, medidas sempre justificadas com estudos hidrogeológicos específicos.

O Artº.5º do mesmo decreto-lei faz ainda referência à protecção sanitária da captação, nomeadamente no que se refere à protecção da «cabeça» das captações verticais de águas subterrâneas – poços ou furos – deve estar fechada e a cota superior à do terreno circundante para evitar a entrada de substâncias de qualquer tipo. O revestimento da captação deve ser exteriormente rodeado por uma superfície impermeabilizante que promova a drenagem de águas para áreas afastadas da captação.

No Artº.6º. são definidas as servidões administrativas e restrições de utilidade pública nas diferentes zonas de protecção às captações: Na zona de protecção imediata é interdita qualquer instalação ou actividade, com excepção da 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. Na zona de protecção intermédia podem ser interditas ou condicionadas as actividades e instalações quando se demonstrem serem susceptíveis de provocar poluição da água. Estão indicadas situações relacionadas com: a) pastorícia; b) usos agrícolas e 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 e esgotos; l) unidades industriais; m) cemitérios; n) pedreiras e quaisquer escavações; o) explorações mineiras; p) lagoas e quaisquer obras ou escavações destinadas à recolha e armazenamento de água ou quaisquer substâncias susceptíveis de se infiltrarem; q) depósitos de sucata. Na zona de protecção intermédia são interditas as seguintes actividades e instalações: a) infra-estruturas aeronáuticas; b) oficina ou 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.

Na zona de protecção alargada podem ser interditas ou condicionadas actividades e instalações quando se demonstre susceptíveis de provocarem poluição das águas subterrâneas como sejam: a) utilização de pesticidas móveis ou 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 sucessíveis de se infiltrarem; e) estações de tratamento de águas residuais; f) cemitérios; g) pereiras 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; e 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.

Na zona de protecção especial são interditas quaisquer actividades ou instalações. Quando existe perigo de avanço da cunha salina podem ser limitados os caudais de exploração das captações existentes e interdita a construção de novas captações ou condicionada a exploração interferindo no regime de exploração.

No Artº.9º é feito o enquadramento nos planos de bacia hidrográfica e de ordenamento do território que deverão obrigatoriamente contemplar os perímetros de protecção delimitados nos termos da lei.

A Lei da Água inclui a temática das diferentes zonas de protecção no seu artº.37º, inserido na sua Secção IV - Protecção e Valorização - refere as medidas de conservação e reabilitação da rede hidrográfica e zonas ribeirinhas, zona costeira e estuários, zonas húmidas e ainda a protecção especial de recursos hídricos onde se enquadram os perímetros de protecção e as zonas adjacentes às captações, zonas de infiltração máxima e zonas vulneráveis. E ainda medidas de protecção contra cheias e inundações, protecção contra secas, contra acidentes graves de poluição, de protecção contra rotura

de infra-estruturas hidráulicas e estado de emergência ambiental. No entanto, embora constituam diferentes artigos da lei, são assuntos que se relacionam muito directamente entre si e deverão ser abordados de acordo com as diversas realidades locais e de forma integrada e abrangente, pois os vários acontecimentos hidrológicos em determinadas zonas são causas e condicionamentos noutros locais. Esta interacção deve ser estudada e compreendida para que se possa realizar uma adequada e eficiente protecção das águas subterrâneas para abastecimento público e não só.

Nos últimos anos, Portugal tem transposto várias directivas comunitárias para a lei nacional, embora muitos dos seus preceitos sejam fundamentados em características desta organização europeia, nem sempre se adequam correctamente à realidade nacional devido, em especial, às grandes diferenças ambientais, sociais, económicas e culturais entre os diversos Estados-membros. Muitas vezes a publicação de novas leis com conteúdos e regras teoricamente bastante avançados, não reflectem as grandes diferenças e diversidades existentes entre o norte e sul da Europa, o que torna a implementação de tais normas num esforço considerável em relação à sua relativa baixa eficácia.

Em relação às águas subterrâneas o conhecimento pleno dos recursos e do seu comportamento não se encontra ainda amplamente difundido no nosso país. Embora não nos falte capacidade técnica os meios necessários para o desenvolvimento de determinados estudos e investigações estão bastante limitados, não passando na maior parte dos casos de estudos académicos. De caris essencialmente teórico, raramente passam do hipotético à prática (realidade), especialmente no que diz respeito à obtenção de parâmetros hidráulicos reais. Ficam assim impossível de controlar os volumes a captar, como e quem pode ou deve fazê-lo.

Os primeiros registos referentes à política de utilização das águas subterrâneas em Portugal datam de 1884 e surgiram no reinado de D. Maria II com a criação dos primeiros serviços hídricos portugueses e a “vedoria” da Casa Real. A primeira Lei da Água (Decreto nº.5787-III) só foi publicada a 10 de Maio de 1919 após a implantação da República. Os serviços da água, até à década de 90, eram da competência de diversos organismos, como direcções gerais. Dos vários aspectos relevantes desta Lei, é de

salientar o facto de permitir, mediante licença, a abertura de minas e perfuração e poços, sem garantia de condições técnicas e científicas para o efeito.

Esta forma de apropriação da água passou a ser vista como precursora do princípio do utilizador-pagador. No que diz respeito ao uso para diluição e transporte de poluentes, determinava que o dono de qualquer terreno poderia apropriar-se por meio de poços, galerias, etc., das águas que existiam abaixo da superfície de seu prédio, desde que não prejudicasse outros aproveitamentos existentes ou desviasse, do seu curso natural, águas destinadas ao uso público.

De acordo com a lei de 1919, a abertura de poços em terrenos públicos era permitida somente através de concessão administrativa. A Constituição da República de 1976 pouco alterou o código da água, excepto através de Artigo 81º, que incumbe prioritariamente ao Estado, no âmbito económico e social, a adoptar uma política nacional da água, contemplando o aproveitamento, planeamento e gestão racional dos recursos hídricos. Não havendo uma lei específica, a nível nacional, que trate de questões legais das águas subterrâneas é em 1990, com a criação do Instituto da Água e a Administração de Recursos Hídricos, publicado o decreto-lei 90/90 de 16 de Março, fica estabelecido que as águas subterrâneas passam a ser considerada como jazidas minerais. É definido o conceito de recurso geológico onde ficam englobados os recursos hidrominerais e geotérmicos. Estes ficam a fazer parte do domínio público do Estado, podendo as águas de nascente ser objecto de propriedade privada ou outros direitos reais. Este decreto-lei é um dos primeiros em Portugal, criado especificamente para a gestão dos recursos subterrâneos, aborda a necessidade de proteger e restringir a captação destas águas através da fixação de perímetros de protecção a fim de garantir a disponibilidade e as características da água. Contempla três zonas de protecção (zonas imediata, intermédia e alargada). Na zona imediata ficam proibidas ou condicionadas, mediante autorização prévia da entidade competente, determinadas actividades tais como: a) construções de qualquer espécie; b) sondagens e trabalhos subterrâneos; c) realização de aterros, desaterros ou de outras operações que impliquem ou tenham como efeito modificações no terreno; d) utilização de adubos orgânicos ou químicos, insecticidas, pesticidas ou quaisquer outros produtos químicos; e) despejo de detritos e de desperdícios e a constituição de lixeiras; f) realização de trabalhos para a condução, tratamento ou recolha de esgotos e, ainda, o corte de árvores e arbustos, a destruição de plantações e a

demolição de construções de qualquer espécie. Na zona intermédia estas mesmas actividades ficam igualmente condicionadas à autorização da entidade competente se, da sua prática, comprovadamente, não resultar interferência no recurso ou dano para a exploração. Na zona alargada de protecção mantêm-se a interdição para as actividades referidas quando estas representem risco de interferência ou contaminação para o recurso.

No entanto, a questão da gestão das águas subterrâneas é pouco discutida, uma vez que pela Constituição Portuguesa, de 1976, são do domínio público todas as águas, onde se incluem também as subterrâneas. Fica o Estado incumbido de implementar legislação específica neste domínio (decreto-lei nº70/90 de 2 de Março, nº.45,46 e 47/94 de 22 de Fevereiro). Porém, mesmo diante da importância das águas subterrâneas, a legislação nacional não abrange de forma satisfatória este recurso.

Em 1999, através do decreto-lei nº.382/99, de 22 de Setembro são instituídos os perímetros de protecção das captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público, estendendo conceitos anteriormente aplicados apenas aos recursos hidrominerais e geotérmicos.

Apesar de tudo, só em 2007 foi implementado o actual quadro administrativo referente aos recursos hídricos com a criação das Administrações de Região Hidrográfica (ARHs), com base na Lei da Água (Lei 58/2005) em cumprimento da agenda europeia para os recursos hídricos nos Estados-membros.

A gestão dos recursos hídricos em Portugal ganhou um grande estímulo com a aprovação da Lei da Água. No âmbito da lei são publicados os princípios básicos a ter em conta neste domínio em todos os Estados da União Europeia em termos de política da água. É reconhecida a água como um bem finito e vulnerável, com valor económico, indutor do uso racional. Serve de base institucional à implementação de uma política de cobrança pela utilização dos recursos hídricos e da gestão descentralizada e participativa.

Esta lei dedica alguns artigos às águas subterrâneas (Artigos 60º e 61º). O uso é condicionado e mediante a atribuição de licença prévia ou à prévia concessão para as utilizações privativas dos recursos hídricos, como captação de água para abastecimento público, para rega de área superior a 50 ha e a recarga e injeção artificial de águas

subterrâneas. Como os usos sujeitos a títulos de utilização são passíveis de cobrança de taxa (Artigo 66º), as águas subterrâneas também o são segundo o tipo de uso.

Se há carência na legislação no que se refere às águas subterrâneas, a deficiência ainda é maior quanto ao referencial de protecção das captações para o abastecimento público de água.

Em Portugal, são poucos ou inexistentes os municípios ou entidades gestoras que contemplam normas específicas para protecção das águas subterrâneas. Mesmo tendo a maioria deles, despertado para a necessidade de criar mecanismos de gestão das águas de um modo geral, disciplinando a gestão e garantindo o planeamento do uso da água em todas as suas formas, a questão da protecção dos recursos subterrâneos ainda é bastante subestimada.

Na região hidrográfica do Tejo (ARH Tejo), foi o município da Golegã o pioneiro nesta questão. A Resolução do Conselho de Ministros nº-186 de 11 de Dezembro de 2003, dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do município através da delimitação das zonas de protecção e os seus condicionalismos de acordo com o previsto no decreto-lei nº.382/99, de 22 de Setembro. Ficam definidas as áreas de infiltração máxima, áreas de restrição e controle e área de protecção de poços e outras captações. É instituído o perímetro imediato de protecção sanitária (no raio de 10 m da captação) e estabelecidos os perímetros intermédios de alerta, para tempos de trânsito de 50 dias.

Em relação a captações de águas minerais, o decreto-lei 90/90 de 16 de Março, específica a obrigatoriedade de se estabelecerem áreas de protecção para fontes naturais. Este decreto-lei visa regulamentar, através do capítulo II, Artigos 36º a 44º, acções e procedimentos necessários à definição de áreas de protecção das fontes, balneários e estâncias de águas minerais e potáveis de mesa em todo o território nacional, com o objectivo de preservação, conservação e racionalização do uso.

Outros municípios já publicaram a suas menções (Portarias) sobre delimitação de Perímetro Imediato a fim de efectuar a devida protecção sanitária das captações, um processo em curso. O resumo dos municípios, bem como os respectivos limites de protecção, na ARH Tejo, encontra-se discriminado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Perímetros de Protecção na área de ARH Tejo

Município	Diploma
Caldas da Rainha	Portaria nº129 de 1 de Abril de 2011
Óbidos	Portaria nº983 de 24 de Setembro de 2010
Golegã	Resolução do Conselho de Ministros nº-186 de 11 de Dezembro de 2003
Mora	Portaria nº982 de 24 de Setembro de 2010 Portaria nº97 de 9 de Março de 2011
Alcochete	Portaria nº1188 de 17 de Novembro de 2010 Portaria nº97 de 9 de Março de 2011
Alenquer	Portaria nº188 de 28 de Março de 2011
Barreiro	Portaria nº963 de 23 de Setembro de 2010
Setúbal	Portaria nº689 de 22 de Julho de 2008 Portaria nº97 de 9 de Março de 2011
Santarém	Portaria nº130 de 1 de Abril de 2011
Alcanena	Portaria nº1186 de 17 de Novembro de 2010 Portaria nº97 de 9 de Março de 2011
Torres Vedras	Portaria nº93 de 2 de Março de 2011
Lisboa	Portaria nº1187 de 17 de Novembro de 2010 Portaria nº97 de 9 de Março de 2011

3.6.- QUADRO COMUNITÁRIO E INTERNACIONAL

A Europa foi pioneira, a nível internacional, a adoptar o conceito de perímetro de protecção de captações, devido ao facto das águas subterrâneas serem bastante utilizadas no abastecimento público na maior parte dos países (Espanha, Alemanha, França, Bélgica, Dinamarca, Portugal). Segundo dados da Secretaria do Meio Ambiente, Saúde Pública e Protecção ao Consumidor do Estado da Baviera, na década de 80, mais de 60% do volume de água subterrânea captada destinava-se ao consumo humano. Este cenário suscitou grande preocupação com a protecção dos recursos subterrâneos.

Os bons resultados e eficiência alcançados nos países europeus, na optimização de custos e esforços no domínio das águas subterrâneas, levou outros países como os EUA e o Canadá a adoptar estratégia semelhante com a aplicação do conceito de perímetros

de protecção das captações, de forma a garantir a qualidade da água destinada ao abastecimento público.

Os critérios para delimitação das áreas de protecção são variáveis de país para país, no entanto a delimitação de três zonas distintas é um factor comum. Em cada uma destas zonas são restringidas ou proibidas actividades humanas, com grau de exigência crescente da periferia em direcção à captação.

Pacheco *et al* (1991), fizeram a análise de várias legislações internacionais e verificaram que alguns países da Europa e também os Estados Unidos da América têm no seu quadro legislativo, leis relacionadas com as captações de águas subterrâneas. E que estas normas são em geral bem aceites pelos órgãos institucionais que garantem a sua aplicação. Verificaram também que a legislação francesa é a mais adequada e rigorosa no que respeita à qualidade das águas subterrâneas. Em 1902, a legislação deste país previa a instituição de perímetros de protecção contra a poluição na zona limítrofe às captações de água. No entanto, só a partir da década de 50 é que os países industrializados modificaram as suas legislações a fim de melhor fazerem face à degradação dos seus recursos hídricos, através da instituição dos perímetros de protecção.

Segundo Weageningh (1985), a maioria dos países utilizam sistemas multidisciplinares para confrontar a questão da protecção das águas subterrâneas, tornando-se difícil comparar sistemas de protecção em diferentes países. Este facto deve-se às circunstâncias socioeconómicas e políticas de cada país. A Figura 3.1, realizada a partir das informações constantes em EPA (1994) e Ciabatti (1994), mostra esquematicamente como alguns países definem as suas áreas de protecção.

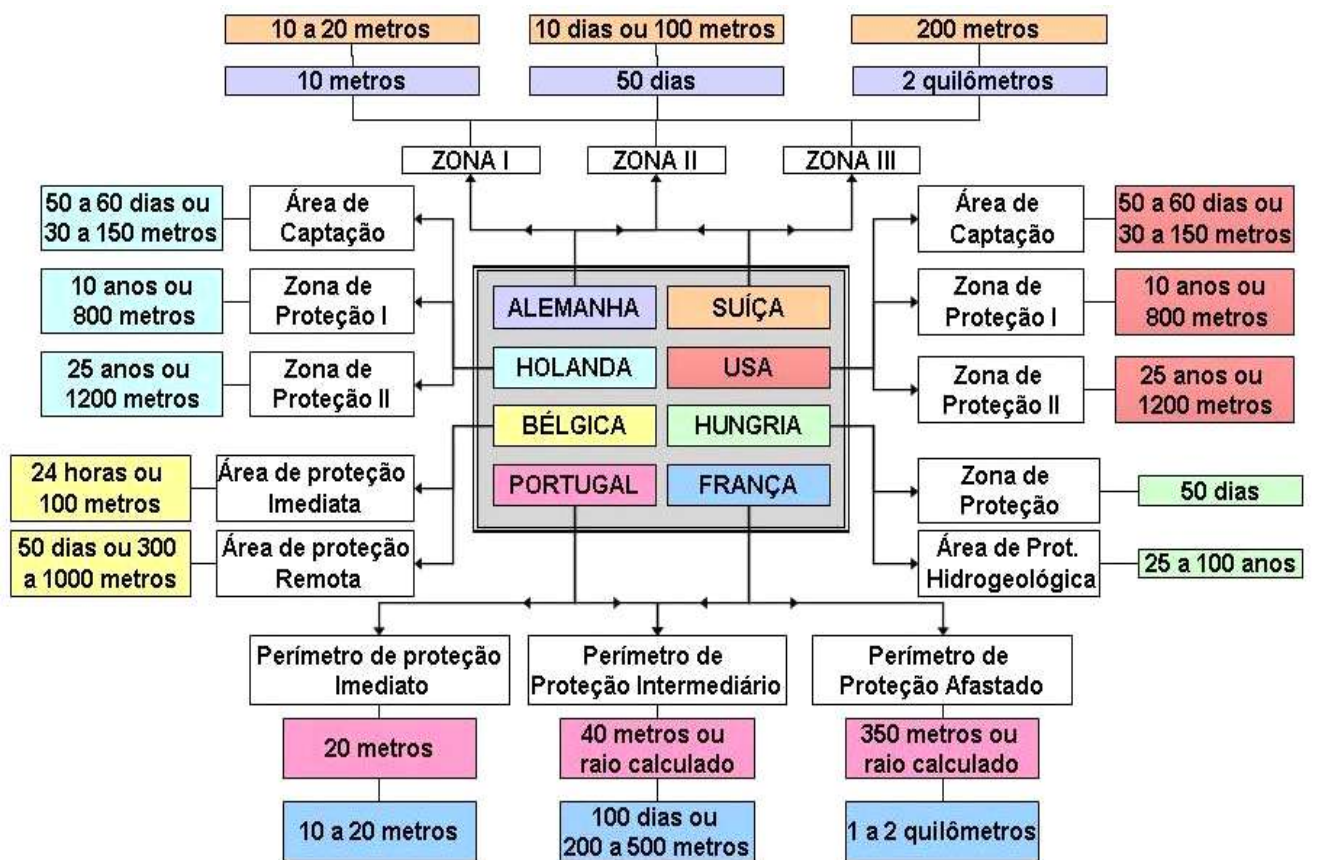


Figura 3.1 - Países que apresentam legislação específica sobre delimitação de perímetros de protecção.

CAPÍTULO – 4

VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS E CAPTAÇÕES

A vulnerabilidade dos aquíferos tem sido definida como a facilidade com que as cargas de contaminantes, com origem na superfície, têm em atingir uma posição específica no sistema aquífero subjacente à região poluída. Segundo alguns autores, a vulnerabilidade não é uma propriedade absoluta, mas uma indicação relativa das áreas onde a contaminação tem maior probabilidade de ocorrer (Nobre, 2006). Ou seja, a vulnerabilidade é uma representação do grau de susceptibilidade do aquífero, perante uma contaminação, e serve fundamentalmente para planear qual o uso a dar ao solo com a finalidade de proteger os aquíferos. Este conceito é muitas vezes alargado às captações. Como complemento existe ainda o conceito de risco à poluição ou contaminação que depende não só da vulnerabilidade mas também da existência de cargas poluentes significativas que possam entrar no ambiente subterrâneo. É possível coexistir num aquífero alto índice de vulnerabilidade e baixo risco à poluição, caso não haja carga poluente significativa ou a existência de um risco à poluição excepcional apesar de baixo índice de vulnerabilidade. O risco é causado não apenas pelas características intrínsecas do aquífero, muito estáveis, mas também pela existência de actividades poluentes, factor dinâmico que, em princípio, pode ser controlado.

No caso dos aquíferos a sua vulnerabilidade deverá ser estudada, analisando possíveis riscos (proximidade de fontes de contaminação, por exemplo). No caso das captações deve-se ter em conta os factores como: idade da captação, tipo de captação, forma como foi concebida e confinamento ou protecção da captação. A vulnerabilidade depende também de factores como a litologia, grau de alteração das rochas, condições hidrogeológicas, entre outras. Por exemplo, as águas de nascente (águas engarrafadas) não estão em contacto directo com o ciclo hidrológico, e, por isso, mantêm constantes a condutividade eléctrica, caudal e temperatura.

É do consenso geral que não há aquíferos invulneráveis e que a avaliação da sua vulnerabilidade deve ser realizada previamente à ocupação da área. Mesmo assim, a avaliação da vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos de uma determinada região, mesmo

após a implantação de determinada actividade, deverá ser uma operação contínua, especialmente nas actividades industriais, constituindo uma ferramenta importante para as entidades gestores e utilizadores das águas subterrâneas na área.

Para avaliar a vulnerabilidade de um aquífero há que desenvolver acções que permitam identificar os processos e as zonas preferenciais de infiltração e caracterizar as descontinuidades à escala dos afloramentos. Os aquíferos menos vulneráveis são os porosos, muito profundos e confinados.

São várias as metodologias que têm sido desenvolvidas para avaliação da vulnerabilidade de aquíferos à poluição. Elas apresentam, entretanto, diferentes concepções com respeito à definição de vulnerabilidade e são agrupadas em três principais categorias: 1) métodos empíricos de indexação ou superposição; 2) métodos determinísticos que empregam modelos de simulação baseados em processos físicos e 3) métodos estatísticos.

As metodologias mais utilizadas nos Estados Unidos, Canadá, Brasil e também na Europa são: AVI – Aquifer Vulnerability Index (Van Stimpvoort *et al.*, 1992), EPPNA – Equipa de projecto do Plano Nacional da Água (INAG, 1998), IS- Susceptibility Index (INAG, 1998), SINTACS – Soggiacenza, Infiltrazione, Non saturo, Tipologia della copertura, Acquifero, Conducibilità, Superficie topografica (Civita *et al.*, 1990), GOD – Groundwater occurrence, Overall aquifer class (Foster 1987) e DRASTIC – aquifer Depth, Recharge rate, Aquifer lithology, Soil type, Topography, Impact, aquifer hydraulic Conductivity (Aller *et al.* 1987). O método DRASTIC associado ao GIS mostrou-se o mais adequado para identificar zonas mais vulneráveis à poluição, sendo, portanto, recomendado para a tomada de decisões quanto ao planeamento do uso e ocupação do solo no futuro. Esse método de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos, associado a atributos, tais como, uso e ocupação do solo, fontes de cargas contaminantes, cobertura vegetal e outros, é fundamental para a gestão de recursos hídricos subterrâneos em especial em áreas com forte uso e ocupação industrial e urbana (LNEC 2006).

O método DRASTIC foi desenvolvido por Aller *et al.* (1987) para a USEPA (Agência Ambiental Norte-americana) para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação. O desenvolvimento do método leva à obtenção de um número que resulta da ponderação de factores intrínsecos ao aquífero e às condições externas relacionadas com a recarga, tipo de solo e declive do terreno, que determinam a susceptibilidade à contaminação.

Para uma área mínima de estudo de 0,4 km², parte do pressuposto que o contaminante é introduzido à superfície do terreno, que migra verticalmente após infiltração, que possui mobilidade igual à da água, condições minimalistas face à complexidade dos fenómenos modificadores da qualidade da água subterrânea por acções externas ao aquífero.

Os parâmetros ponderados através do método DRASTIC são sete (7) e correspondem às 7 letras que compõem a designação, tais como: D – Depth to the water table (profundidade da zona não-saturada do solo); R - Net recharge (recarga profunda do aquífero); A - Aquifer material (material do aquífero); S - Soil type (tipo de solo); T – Topography (topografia); I – Impacto of the unsaturated zone (impacto da zona não-saturada); C - Hydraulic Conductivity (condutividade hidráulica).

A profundidade da zona não saturada condiciona a espessura de material que um poluente tem que atravessar antes de atingir o aquífero. Num aquífero livre a profundidade é a distância ao nível freático. Nos aquíferos confinados, a profundidade representa a profundidade ao topo do aquífero. Se o aquífero é semi-confinado, tem que se optar entre a distância ao nível freático ou ao topo do aquífero. O valor a atribuir varia entre 1 (mais de 30,5 m de profundidade) e 10 (profundidade inferior a 1,5).

A recarga profunda de aquíferos é a variável hidrogeológica correspondente à quantidade de água que, depois de se infiltrar superficialmente no solo, percola, normalmente na vertical, e atinge o aquífero. Este parâmetro condiciona o transporte de um poluente na zona não-saturada e a disponibilidade de água para processos de dispersão e diluição tanto na zona não-saturada como na zona saturada. A recarga depende de muitos factores tais como a Precipitação, Escoamento superficial e Evapotranspiração, que por sua vez dependem da topografia, altimetria, temperatura, cobertura vegetal, porosidade do solo, etc. O valor a atribuir varia entre 1 e 9, o primeiro para recarga inferior a 50,8 mm/ano e o último quando supera 254 mm/ano.

A composição litológica do aquífero relaciona a capacidade de atenuação do aquífero, na presença de um contaminante. Influencia o fluxo subterrâneo e os caminhos a percorrer pelo contaminante (advecção). Com a condutividade hidráulica e o gradiente hidráulico, determinam o tempo necessário para actuação dos processos de atenuação. De um modo geral, uma rocha de grão mais grosseiro ou com mais fracturas e cavidades, possui maior condutividade hidráulica e ao mesmo tempo uma menor capacidade de atenuação.

O valor atribuir poderá variar de 1 a 10 consoante o tipo de rocha. O valor 1 é para rocha argilosa e o valor 10 para calcário carstificado.

O solo pode atenuar os efeitos nocivos dos contaminantes. Na selecção do tipo de solo deve-se escolher o(s) horizonte(s) mais significativo(s) para o potencial atenuante do solo. Solo argiloso, devido à presença de argila com reduzida permeabilidades tem maior capacidade de atenuação. O valor 10 é reservado para solos pouco espessos e o 1 para argila consolidada.

A topografia refere-se ao declive da superfície do terreno. Este parâmetro condiciona a probabilidade de um poluente escoar superficialmente ou de permanecer à superfície durante o tempo suficiente para se infiltrar. Por outro lado o gradiente hidráulico e a direcção de fluxo dependem do declive. Normalmente, maiores declives implicam maiores gradientes hidráulicos e, conseqüentemente, maiores velocidades de escoamento subterrâneo.

A zona não-saturada engloba igualmente a zona descontinuamente saturada acima do nível freático. O tipo de material da zona não saturada condiciona o tempo de contacto com o poluente, permitindo a ocorrência de processos físicos, químicos e biológicos de biodegradação, neutralização, filtração mecânica, reacção química, volatilização e dispersão. A facturação é particularmente importante nesta zona pois facilita a percolação vertical do poluente até ao aquífero.

A condutividade hidráulica determina a capacidade do aquífero para transmitir água, o que, juntamente com o gradiente hidráulico, controlam o fluxo de água subterrânea. A condutividade hidráulica depende da quantidade e conectividade dos espaços vazios do aquífero (porosidade eficaz). Estes podem ser poros, fracturas, cavidades ou planos de estratificação.

O índice DRASTIC obtém-se através da expressão: $DRASTIC = \sum (\text{Parâmetro} \times \text{Peso})$. O peso de cada parâmetro reflecte a sua importância relativa. Varia de 1 a 5, sendo o peso 5 o factor mais significativo e o peso 1 menos significativo. A Tabela 4.1 apresenta os valores das classes de vulnerabilidade do índice DRASTIC de acordo com Allen *et al.*, (1987).

Tabela 4.1 - Classes de vulnerabilidade do índice DRASTIC.

Índice DRASTIC	Classe de Vulnerabilidade
>199	Muito alta
160 - 199	Alta
120 - 159	Intermédia
<120	Baixa

O índice DRASTIC pode variar entre 23 e 230. Quanto maior for o índice DRASTIC, tanto maior será a vulnerabilidade do aquífero à contaminação. Um valor baixo para o índice significa reduzida vulnerabilidade. O índice determinado por este processo é independente da carga poluente.

CAPÍTULO - 5

PROTECÇÃO DE CAPTAÇÕES DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

5.1 - CRITÉRIOS

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

Os critérios a utilizar na delimitação dos perímetros de protecção consistem na combinação de aspectos técnicos ou outros, de ordem legal ou administrativa, relacionados na maioria das vezes com a ocupação do solo. Nestas situações geralmente opta-se por critérios mais simples em detrimento de critérios tecnicamente fundamentados e mais sofisticados. Na Tabela 5.1 são resumidos os principais critérios com acção na propagação da contaminação tendo em conta o processo físico e químico predominante no processo de difusão.

Tabela 5.1 – Relação entre os critérios que podem empregar-se na delimitação dos perímetros de protecção e os processos físicos que controlam (baseado em fonte EPA, 1987).

Critério	Distância	Rebaixamento	Tempo de Propagação	Critérios Hidrogeológicos
Processo físico				
Advecção		X	X	
Dispersão hidrodinâmica (dispersão mecânica e difusão molecular)		X		X
Interação sólido - soluto (Reacções químicas de absorção)		X		X

Os critérios que são tidos em conta no processo de delimitação de perímetros de protecção são basicamente a distância à captação, o rebaixamento do nível hidrostático provocado pelo bombeamento, o tempo de propagação e as características hidrogeológicas. Cada um actua do seguinte modo:

Distância - Delimitação simples de uma área definida por um círculo ou, mais habitualmente, por um quadrado em que a captação se localiza no centro. É um critério rápido e muito simples, mas não considera o fluxo de água subterrânea e os processos de transporte de poluentes. Por estas razões é o critério menos eficaz. Pode considerar-se como o que dará mais baixo nível de protecção. É muitas vezes utilizado na fase preliminar de estudos de delimitação de perímetros de protecção.

Rebaixamento – Este critério consiste na definição do cone de rebaixamento ou área de influência da captação. Tem em consideração as alterações que ocorrem na direcção do fluxo e o aumento da velocidade de chegada da água à captação. Assenta na variação do caudal de exploração. Este critério tem sido mal aplicado em numerosas ocasiões devido à ideia errada de que a área de recarga e a área de influência coincidem. Isto só é verdade para as zonas onde o gradiente hidráulico é nulo ou desprezável antes do início da bombagem (Figura 5.1).

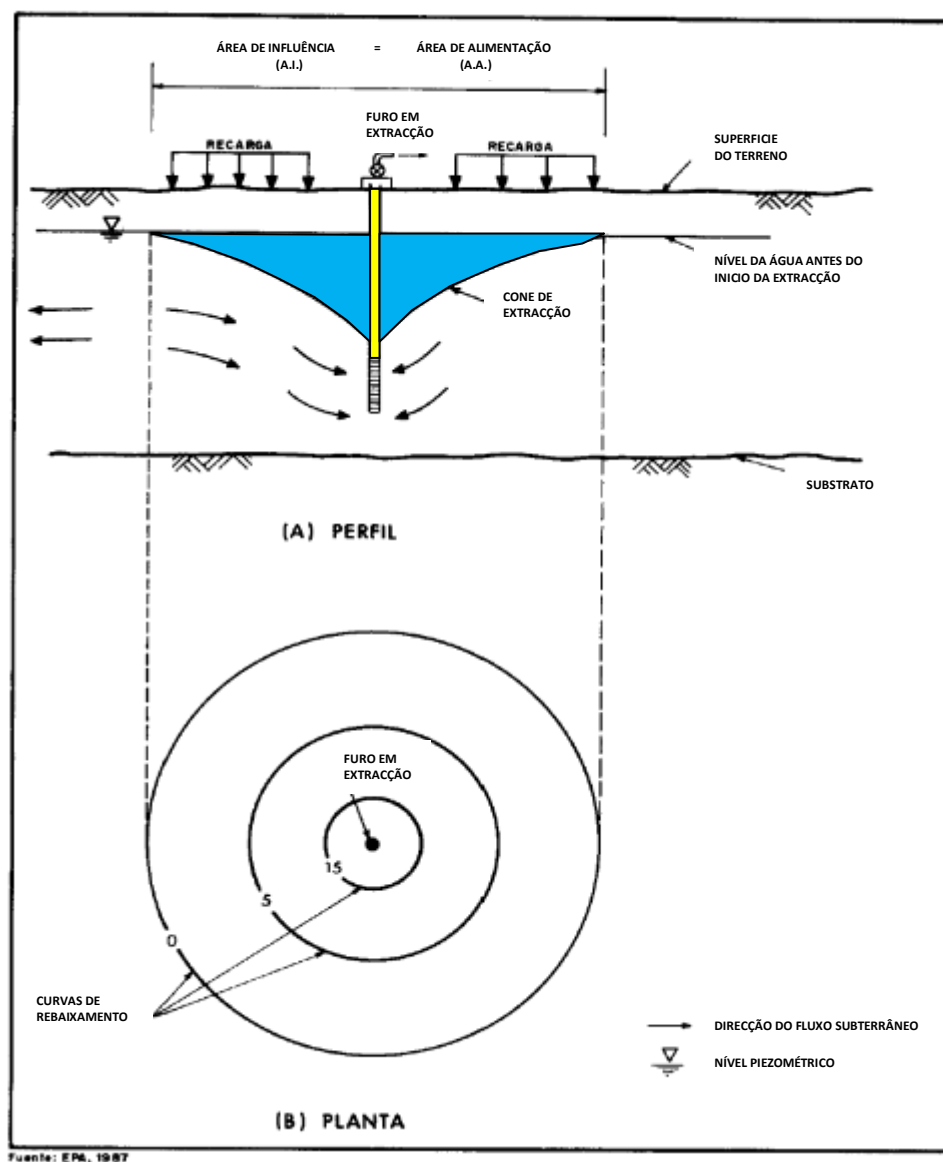


Figura 5.1 – Área de influência e área de recarga (alimentação) de um aquífero sem gradiente hidráulico em regime estacionário e com precipitações elevadas (Fonte: adaptado de EPA, 1987).

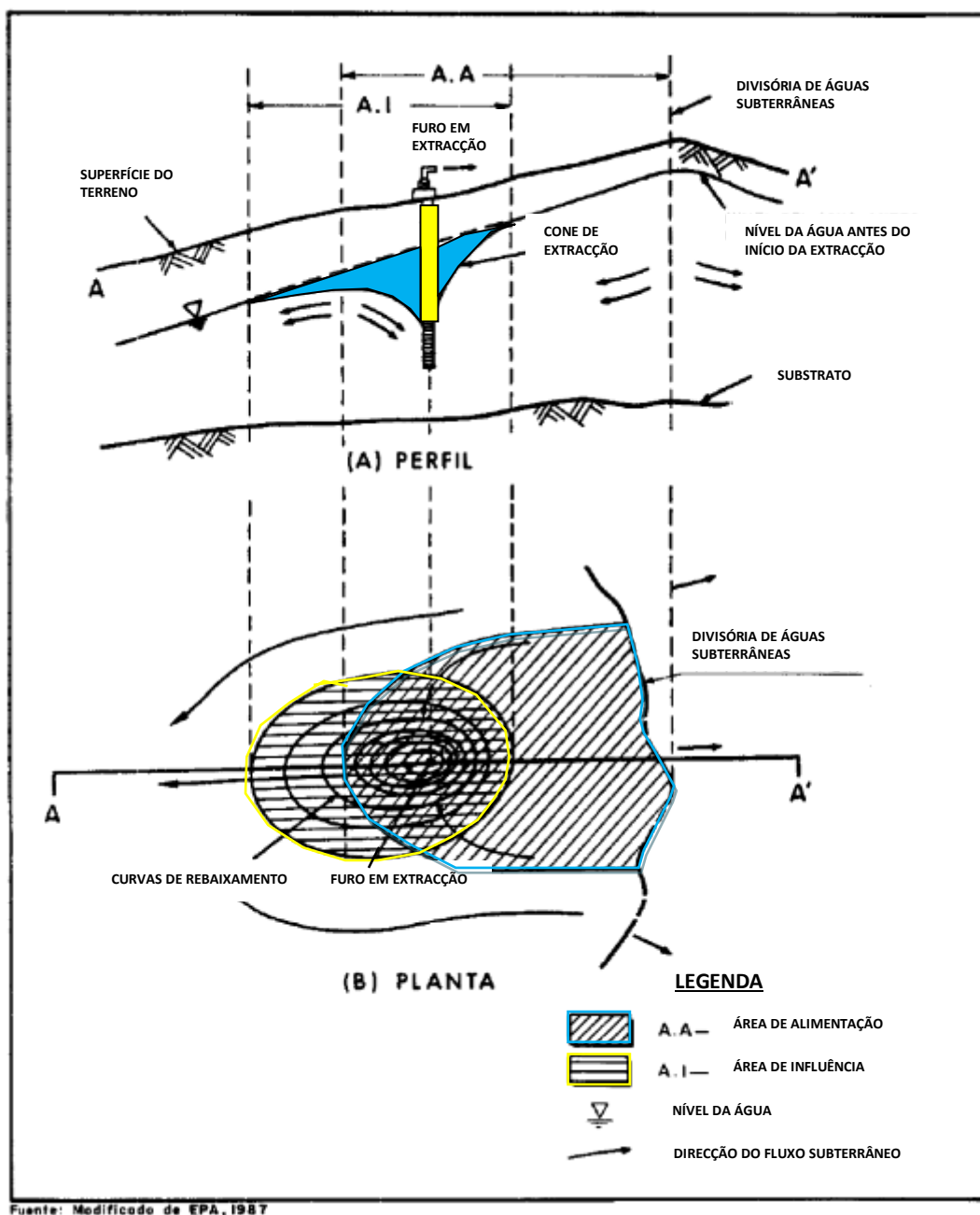


Figura 5.2 – Área de influência e área de recarga (alimentação) de um aquífero com gradiente hidráulico em regime estacionário (Fonte: Adaptado de EPA, 1987).

A Figura 5.2 mostra a diferença entre a área de recarga e a área de influência quando se considera o gradiente hidráulico. Neste caso, que é o mais habitual, nem toda a área de influência se encontra dentro da zona de recarga e a contaminação produzida fora da área de influência, mas dentro da área de recarga, poderá alcançar a captação dentro de

um período de tempo que varia em função da distancia à mesma. Em determinadas situações este critério não conduz à protecção mais adequada da captação, uma vez que a zona de influência não tem em consideração a zona a montante da de contribuição.

Tempo de propagação – Consiste em avaliar o tempo que a água subterrânea ou um poluente demora a atingir a captação, partindo de um ponto pré-definido na zona de contribuição. Neste caso são definidas isócronas (ou zonas de transporte) referentes aos períodos de tempo adoptados para a zona de protecção. É um dos critérios com maior precisão, pois considera os vários factores do processo de propagação do poluente, como sejam a advecção, dispersão e interacção entre a fase sólida e líquida. A maior parte dos países escolheram este critério para definir o perímetro de protecção de captações, para o tempo de trânsito de 1 dia na zona imediata, entre 50 a 60 dias para a zona intermédia e 10 anos para a zona alargada, em função da biodegradação dos contaminantes.

Hidrogeológicos – Também designados por fronteiras de fluxo, consistem na definição da área geográfica que contribui com água para a captação. Esta área geográfica pode se utilizada como zona de protecção. O critério baseia-se nas várias entidades físicas ou divisões hidrogeológicas que condicionam o fluxo subterrâneo. Este critério é muito útil, em especial, na fase inicial do estudo de delimitação dos perímetros de protecção, uma vez que, sobredimensiona o perímetro de protecção, razão porque deverá sempre ser utilizado em conjunto com outros critérios menos abrangentes.

O poder auto-depurador do terreno ou a sua capacidade de assimilação é muitas vezes considerado na delimitação da área a proteger uma vez que tem em consideração a capacidade do aquífero para imobilizar ou atenuar a concentração de poluentes que atravessam a secção saturada ou não saturada do aquífero, antes de alcançar a captação. Contempla processos de diluição, dispersão, absorção, adsorção, precipitação química ou degradação biológica. A aplicação deste critério exige conhecimentos sobre modelos de transporte de massa e informação sobre a hidrogeologia, geologia e geoquímica da área afectada.

5.2 - MÉTODOS

De seguida são apresentados alguns métodos que podem ser utilizados na delimitação de perímetros de protecção de captações de água subterrânea. As metodologias sugeridas têm custos de implementação e graus de complexidade variáveis. A selecção do método mais adequado, em cada situação, depende da informação e dos recursos disponíveis.

Os métodos mais utilizados dividem-se em três categorias a saber: 1) os métodos geométricos compreendem a atribuição de um raio; 2) os métodos analíticos e numéricos simplificados, apoiados em modelos hidrogeológicos conceptuais, permitem definir um raio ou polígono de protecção; 3) os métodos numéricos baseados em modelos numéricos de sistemas hidrogeológicos não dispensam a cartografia hidrogeológica detalhada do local, ensaios hidráulicos e caracterização hidrogeoquímica.

5.2.1 – MÉTODOS GEOMÉTRICOS

5.2.1.1 – MÉTODOS DO RAO FIXO ARBITRÁRIO

Este método é o mais simplificado. Baseia-se na definição de uma área circular, centrada no ponto de captação de raio escolhido arbitrariamente. Este processo pode ser usado para determinar uma área de protecção provisória, em fase preliminar, até que se estabeleça o processo a ser utilizado ou até se efectivarem outros estudos, mais detalhados sobre a região (ITGE, 1991).

Na determinação do raio devem ser consideradas as condições hidrogeológicas locais. Em situações de grande condutividade, este deverá ser suficientemente grande para permitir uma protecção adequada da captação.

Como a metodologia não apresenta critérios estabelecidos, a sua utilização pode gerar erros, tais como, sobreposição de áreas de recarga e consequente aumento dos custos na aquisição ou no excesso de controlo do uso do solo, onde não haveria necessidade de

protecção. Ou o contrário, as áreas de recarga distantes da captação não estarem integradas na zona de protecção.

Este método permite a produção de formas simplificadas de perímetros de protecção com base nos critérios de fronteira de fluxo e tempo de propagação. Se a porosidade, condutividade hidráulica e espessura saturada do aquífero forem uniformes, em toda a área, as formas simplificadas são obtidas variando apenas o caudal de extracção. Se as características do aquífero variarem, torna-se necessário utilizar diferentes combinações com os parâmetros do aquífero e caudal de extracção.

Apresenta como vantagem o facto de ser bastante simples e rápida ou seja é facilmente aplicado e os custos de implementação são reduzidos, uma vez que não necessita de grande quantidade de informações nem grande experiência técnica.

5.2.2 – MÉTODOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS SIMPLIFICADOS

Os métodos analíticos permitem através da resolução de equações simples efectuar o cálculo de áreas das zonas de protecção. Para a sua aplicação é necessário conhecer ou estimar alguns parâmetros hidrogeológicos como, por exemplo, a transmissividade, porosidade, gradiente hidráulico, condutividade hidráulica, o caudal de extracção e a espessura saturada do aquífero.

São geralmente os métodos mais utilizados, pois possibilitam a comparação com outras metodologias de delimitação de perímetros de protecção. Apesar do grande número de simplificações quanto à geometria e às influências exteriores nas águas subterrâneas, os métodos analíticos possibilitam soluções minimamente adequadas (EPA, 1994).

No entanto estes métodos apresentam duas limitações. A primeira resulta de considerarem uniformes as características do aquífero, não têm em consideração a existência de fronteiras hidrogeológicas (rios, lagos, canais), heterogeneidades no aquífero e a recarga. A segunda é a impossibilidade de calibração e validação do modelo,

uma vez que, ao arbitrar determinada situação para o sistema, esta pode não representar a realidade.

Nos modelos analíticos, o cálculo do perímetro de protecção, baseia-se na direcção do fluxo da água subterrânea. Os parâmetros utilizados resultam de estudos regionais ou de medições directas do nível hidrostático ao longo do tempo. Os cálculos podem ser efectuados mediante o tempo de propagação ou do rebaixamento.

5.2.2.1 – MÉTODO BASEADO NA LEI DE DARCY

A lei de Darcy relaciona a velocidade linear de escoamento no aquífero poroso com o gradiente e a condutividade hidráulica. De todas as equações, é a mais simples para calcular o tempo de propagação de um poluente, desde o momento da infiltração até alcançar a zona de extracção ou a captação (EPA, 1994).

$$v = \frac{K i}{n} \quad (01)$$

Sendo:

v - velocidade linear média ou velocidade real de escoamento (metros/dia);

K - condutividade hidráulica horizontal (m/dia);

i - gradiente hidráulico horizontal;

n – porosidade eficaz.

Conhecida a velocidade média, pode ser calculado o tempo de propagação ao longo de uma determinada distância:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{d.n}{K.i} \quad (02)$$

Onde:

t - tempo de propagação (dia);

d – distância percorrida (m).

Ainda pode ser calculada a distância aos limites que definem o tempo de propagação:

$$d = v.t = \frac{k.i.t}{n} \quad (03)$$

Onde:

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

Esta equação é especialmente indicada para aquíferos porosos, não sendo adequada para meio fissurado ou carstificado. No caso dos aquíferos fracturados a lei só é válida se a densidade de fracturação permitir aproximações ao meio poroso. Pode usar-se em aquíferos confinados, com superfície piezométrica quase plana, ou em aquíferos livres, com superfície freática plana e pequeno rebaixamento relativamente à espessura saturada do aquífero ou com zona de ralos ($< 10\%$). Pode ainda ser utilizada no cálculo do tempo de propagação de um poluente desde um ponto de entrada até um ponto a jusante da captação, mas apenas se as linhas equipotenciais forem aproximadamente espaçadas entre os dois pontos, isto é, se o aquífero for homogéneo. A aplicação deste método implica uma razoável precisão na medição ou na estimativa da geometria do cone de rebaixamento.

5.2.2.2 – MÉTODO DO RAIOS FIXO CALCULADO

Neste método, indicado para aquíferos confinados, o perímetro de protecção é definido a partir de uma equação volumétrica, que pode utilizar o tempo de propagação do poluente até à captação ou o rebaixamento do nível piezométrico. Em relação ao tempo de propagação, a equação permite calcular o raio de uma secção cilíndrica do aquífero, com centro no ponto de captação e com capacidade de contenção do volume de água captada durante um determinado tempo de propagação. Este tempo é necessário para que o efeito de um potencial poluente seja minimizado até apresentar concentrações seguras, antes de alcançar a captação (Moinante, 2004). O tempo de propagação define o raio da área de protecção, ou raio da secção cilíndrica através da qual a água subterrânea e os poluentes se propagam durante um determinado período de tempo (Figura 5.3). Admite-se, ainda, que a captação é a única a drenar o aquífero e que não existem direcções preferenciais para o fluxo, com todas as linhas de corrente a convergirem para a captação.

Este método é mais indicado para aquíferos confinados, uma vez que o cone de rebaixamento não é cilíndrico e não é considerada a recarga (Moinante, op. cit.). A equação volumétrica (04) representa o raio do perímetro de protecção:

$$r = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{n \cdot H \cdot \pi}} \quad (04)$$

Onde a porosidade eficaz é o único parâmetro hidrogeológico necessário de um conjunto conhecido, tais que:

Q - Caudal de exploração da captação (m³/dia);
 t - tempo de propagação (dia);
 n - porosidade eficaz do aquífero;
 H - espessura saturada na zona da captação (m);
 r - raio do perímetro de protecção (m).

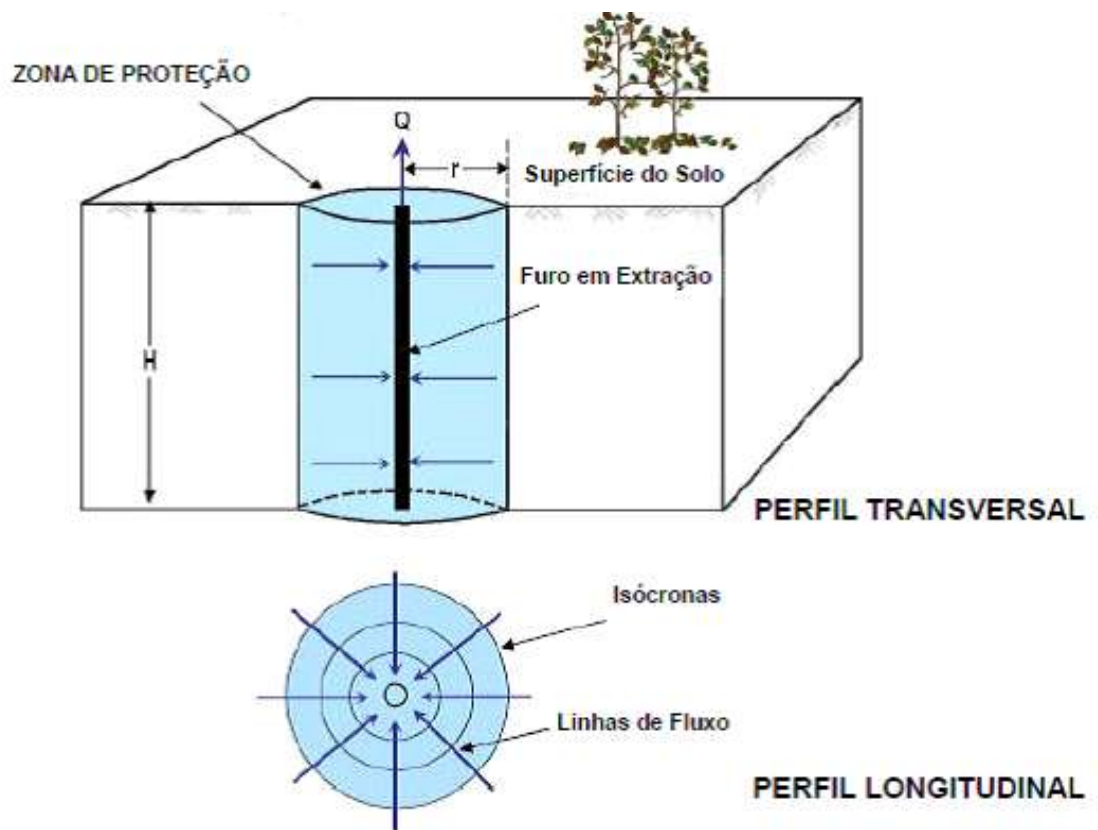


Figura 5.3 – Definição do perímetro de protecção utilizando o método do raio fixo calculado (adaptado de Moinante, 2003)

Relativamente ao rebaixamento do nível piezométrico, a área definida é aquela onde é produzido um determinado rebaixamento do nível piezométrico do aquífero. Geralmente são obtidos melhores resultados quando se arbitram os factores condicionantes da realidade física, relacionadas com as seguintes condições (ITGE, 1991):

- Ausência de recargas anteriores;
- O aquífero é homogéneo e isótropo em relação à permeabilidade;
- O aquífero é infinito em toda a sua extensão;
- A captação tem diâmetro igual a zero;
- A captação atravessa completamente o aquífero;
- A água captada é descarregada instantaneamente e não volta ao aquífero;
- O fluxo de água é radial em torno da captação, não existem componentes verticais;
- A superfície piezométrica regional é praticamente plana;
- O caudal de extracção é constante.

A equação utilizada na aplicação deste método é a Equação de Theis para regime variável:

$$d = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (05)$$

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

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \Leftrightarrow r = \sqrt{\frac{u 4Tt}{S}} \quad (06)$$

Onde:

r – raio da zona de protecção (m);
 Q – caudal de extracção constante (m³/dia);
 T – transmissividade do aquífero (m²/dia);
 S – coeficiente de armazenamento do aquífero;
 t – tempo decorrido desde o início da extracção (dia).

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

$$W(u) = \frac{4 \cdot \pi \cdot T \cdot s}{Q} \quad (07)$$

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

A utilização do raio fixo calculado, seja em função do tempo de propagação ou do rebaixamento, é um processo simples, pouco dispendioso, exige pouca experiência e os dados necessários estão quase sempre disponíveis. Apresenta maior precisão que o método baseado na lei de Darcy. Porém, trata-se de um método pouco exacto, uma vez que não considera todos os parâmetros hidrogeológicos que influenciam o transporte de poluentes, além de conduzir, na maioria das vezes, a uma área superior à obtida pelos restantes métodos.

Segundo o decreto-lei nº.382/99, este método aplica-se a todo o tipo de aquíferos, de acordo com a tabela seguinte:

Tabela 5.2 – Zonas de protecção para os vários tipos de aquífero. (Fonte: decreto-lei 382/99)

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).

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).

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 semi-confinado cujo suporte litológico é constituído por formações porosas;

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

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

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

5.2.2.3 – MÉTODO DO FLUXO ENTRE AQUÍFEROS

(DRENANCIA)

Sempre que exista uma camada entre dois aquíferos deve considerar-se a drenância entre eles no cálculo do perímetro de protecção. O fluxo através da camada drenante pode ser determinado a partir do uso de uma fórmula modificada da Lei de Darcy (EPA, 1994), Moinante, (2003).

$$Q_1 = \frac{K_v}{m} \cdot A \cdot H \quad (08)$$

Onde:

Q1 – quantidade de drenância (m³/dia);

Ky – condutividade hidráulica vertical verificada na unidade confinante (m/dia);

m – espessura da unidade confinante (m);

A – área (m²);

H – diferença de piezometria entre as duas captações (m).

A condutividade hidráulica é a incógnita a ser calculada de modo a distinguir os dois aquíferos. Os mesmos autores sugerem a fórmula (9) para o cálculo.

$$t_v = \frac{n \cdot m \cdot x}{K \cdot H} \rightarrow K = \frac{n \cdot m \cdot x}{40 \cdot H} \quad (9)$$

Sendo:

t – tempo de propagação na vertical através da unidade confinante (normalmente 40 anos);

n – porosidade;

x – distância de propagação através da unidade confinante (geralmente igual a sua espessura) (m).

5.2.2.4 – MÉTODO DA EQUAÇÃO DO FLUXO UNIFORME

A equação de fluxo uniforme tem sido amplamente utilizada para delimitação de perímetros de protecção. Este método é aplicado quando há ocorrência de uma superfície piezométrica inclinada, gerando um cone de rebaixamento assimétrico (EPA, 1994). A equação geral que representa a fronteira da região onde se produz o fluxo na captação é:

$$-\frac{Y}{X} = \tan \left[\frac{2\pi \cdot k \cdot i}{Q} \cdot Y \right] \quad (10)$$

Sendo:

X, Y – coordenadas;

Q – caudal de extracção (m³/dia);

K – condutividade hidráulica (m/dia);

b – espessura saturada (m);

i – gradiente hidráulico.

A definição da zona de contribuição baseia-se em duas equações derivadas da equação anterior, e que representam, respectivamente, a fronteira de fluxo a jusante e a largura máxima da zona de contribuição a montante (Figura 5.4).

$$X_L = -\frac{Q}{2\pi \cdot k \cdot b \cdot i} \quad \text{e} \quad Y_L = \pm \frac{Q}{2\pi \cdot k \cdot b \cdot i} \quad (11)$$

A montante da captação podem ser definidas uma ou mais zonas de protecção, utilizando $\pm Y_L$ como a largura do limite de montante do cone de rebaixamento. Numa fase ulterior é utilizado um mapa piezométrico para estender as linhas de fluxo até uma divisória de águas subterrâneas ou até outra fronteira do aquífero (EPA, 1994) Este método é aplicado a aquíferos confinados o que origina zonas de protecção amplas quando é utilizado o tempo de propagação. Pode também ser aplicada a aquíferos livres com valores de rebaixamento reduzidos, menos de 10% da espessura saturada do aquífero.

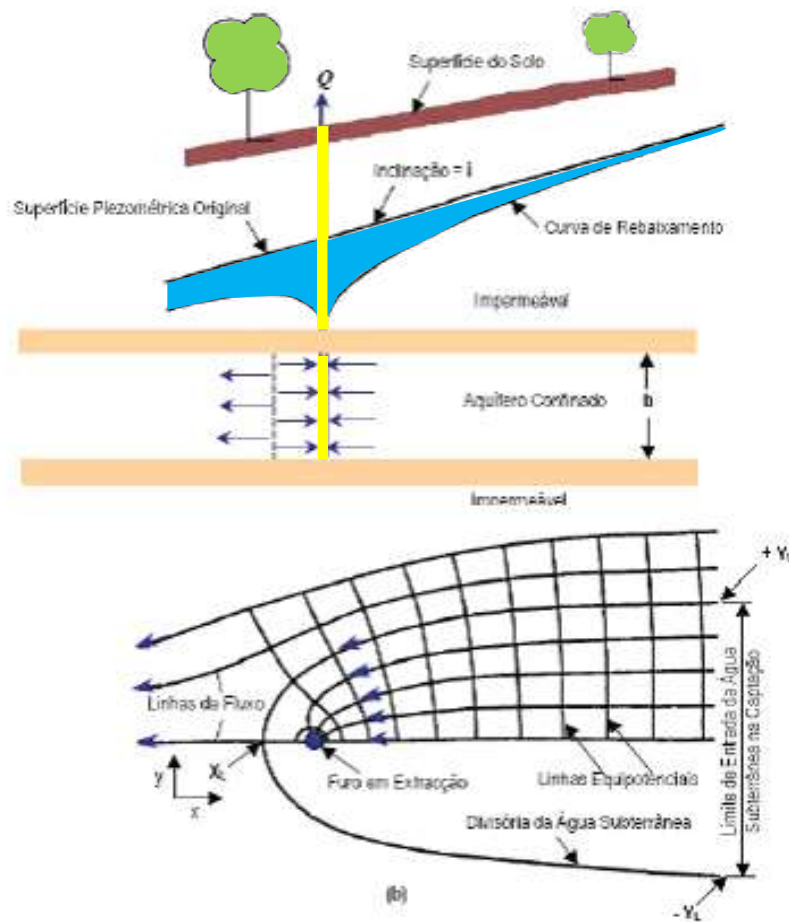


Figura 5.4 – Definição do perímetro de protecção utilizando a equação de fluxo uniforme
(Fonte: Moinante, 2003)

5.2.2.5 – MÉTODO DA EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO DE THIEM

Pela equação de equilíbrio de Thiem, o cálculo da distância de um determinado rebaixamento específico após alcançado o equilíbrio pode ser obtido da seguinte forma:

$$s = \frac{Q}{2\pi K b} \cdot \log_e \frac{r_e}{r} \quad (12)$$

Sendo:

s – rebaixamento relativamente à superfície piezométrica inicial (m);

Q – descarga (m³/dia);

K – condutividade hidráulica (m/dia);

b – espessura do aquífero (m);
 r – distância ao ponto de observação do rebaixamento (m);
 r_e – distância da captação ao rebaixamento nulo do cone de rebaixamento (m).

A utilização da equação de equilíbrio de Thiem pressupõe que:

- O aquífero é homogéneo e isotrópico;
- O aquífero é infinito na sua extensão (i.e. não existem fronteiras ao fluxo no interior do cone de rebaixamento);
- A superfície piezométrica regional é praticamente plana.

5.2.2.6 – MÉTODO DA EQUAÇÃO DE HOFFMAN E LILLICH

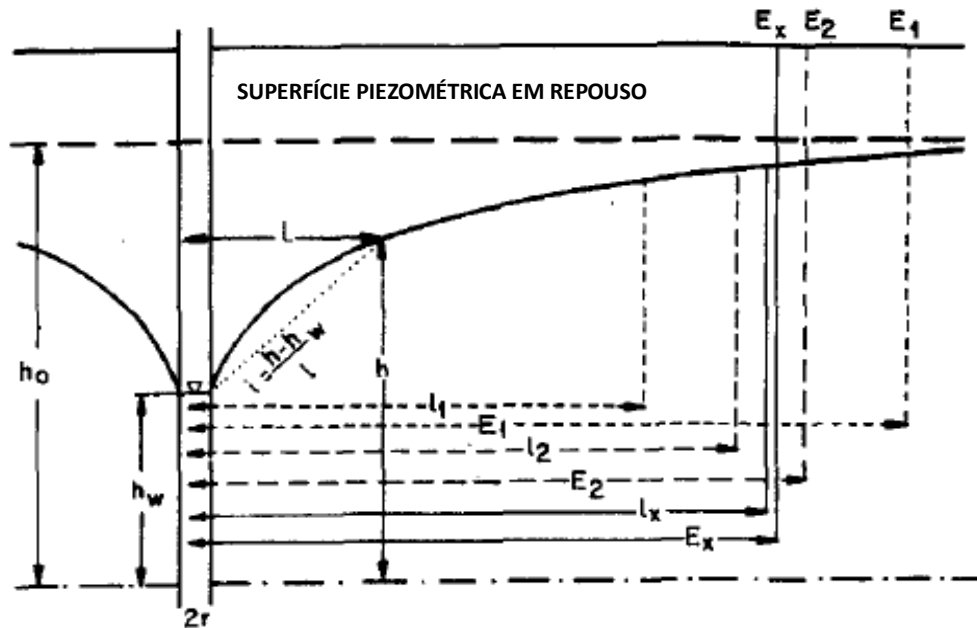
O método de Hoffman e Lillich é aplicável a meios homogéneos, onde se verifique um rebaixamento reduzido em relação à espessura do aquífero. Caso contrário, usa-se a equação de Todd (1964), a qual descreve o rebaixamento nas proximidades de uma captação num aquífero confinado:

$$h - h_0 = (h_0 - h_\omega) \frac{\ln(l/r)}{\ln(R/r)} \quad (13)$$

Sendo:

h – nível piezométrico num determinado ponto (m);
 l – distância desse ponto à captação (m);
 h_0 – nível hidrodinâmico na captação (m);
 h_ω – nível hidroestático (m);
 R – raio de influência (distância entre a captação e o rebaixamento nulo) (m);
 r – raio da captação (m)

O objectivo deste método é encontrar a distância l para a qual o gradiente i assume um valor tal que, ao calcular a velocidade Ve e a distância E correspondente, se encontram os mesmos valores para E e para l. Trata-se portanto, de um processo iterativo dado que se vão atribuindo valores a l até que se obtenha um valor de E igual (Moinante,2003).



Fuente: Hoffman y Lillich, 1973

Figura 5.5 – Determinação das isócronas por iteração (Fonte: Hoffman e Lillich, 1973).

5.2.2.7 – MÉTODO DE WYSSLING (GRADIENTE HIDRÁULICO INCLINADO)

Metodologia de aplicação simples, utilizada para aquíferos porosos homogêneos, considera captações em extracção e superfícies piezométricas inclinadas. Além da porosidade, admite também a condutividade hidráulica e o gradiente hidráulico. Permite, com auxílio das equações, determinar a distância de protecção a jusante e a montante da captação.

$$Q = K.B.b.i \Leftrightarrow B = \frac{Q}{K.b.i} \quad (14)$$

Sendo:

Q – caudal de extracção (m³/dia);

K – condutividade hidráulica (m/dia);

B – Largura da Zona de Chamada (m);

b – espessura saturada do aquífero (m);

i – gradiente hidráulico (declive da superfície freática).

O raio de chamada X_0 (distância da captação ao ponto neutro a jusante) pode obter-se do seguinte modo:

$$X_0 = \frac{Q}{2\pi K b i} \quad (15)$$

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

$$B' = \frac{B}{2} = \frac{Q}{2K b i} \quad (16)$$

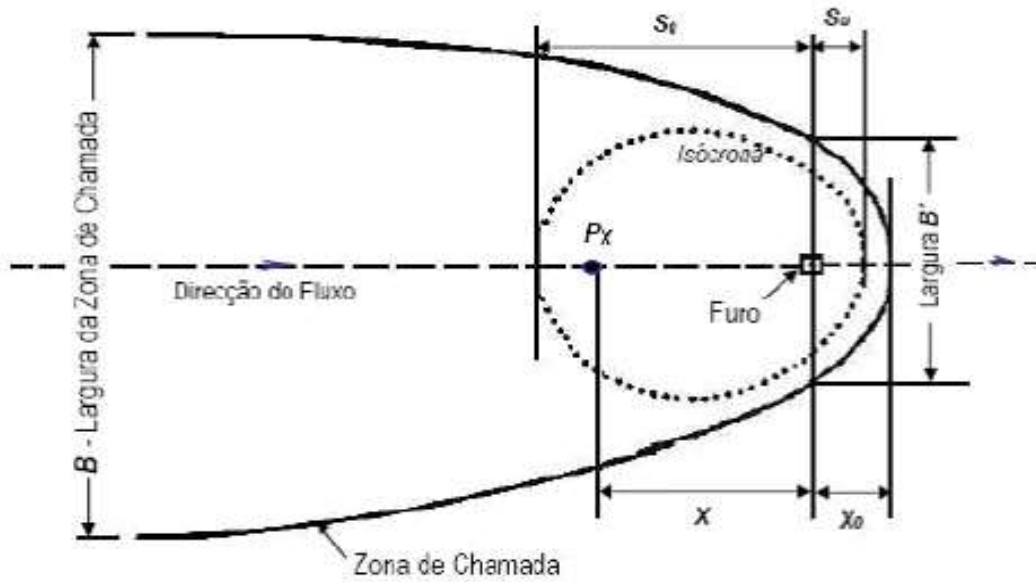


Figura 5.6 – Determinação de isócronas - Método de Wyssling (Fonte: Moinante, 2003).

Depois de definida a zona de chamada, é necessário determinar, na direcção do fluxo, qual o tempo de propagação pretendido, empregando-se as equações:

$$v_e = \frac{K i}{n} \quad (17)$$

$$l = v_e \cdot t \quad (18)$$

$$S_0 = \frac{+l + \sqrt{l(l+8X_0)}}{2} \quad (19)$$

$$S_u = \frac{-l + \sqrt{l(l+8X_0)}}{2} \quad (20)$$

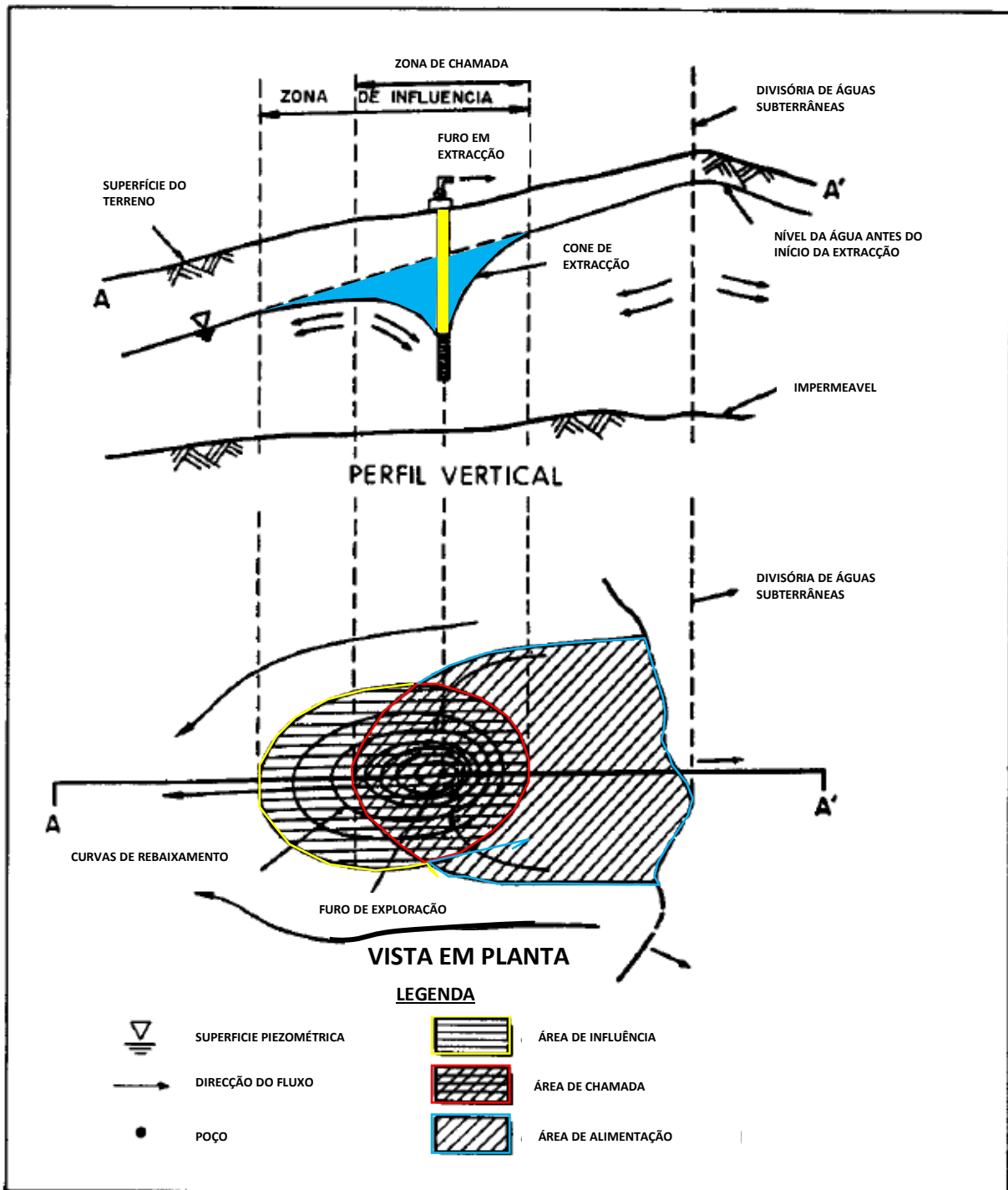
Sendo:

v_e – velocidade eficaz (m/dia);

n – porosidade eficaz (m/dia);

t – tempo de propagação (dia);

S_0 – distância correspondente ao tempo t no sentido do fluxo a montante da captação (m);
 S_u – distância correspondente ao tempo t no sentido contrário do fluxo a jusante da captação (m).



Fuente: A. LALLEMAND, J-C ROUX, 1989

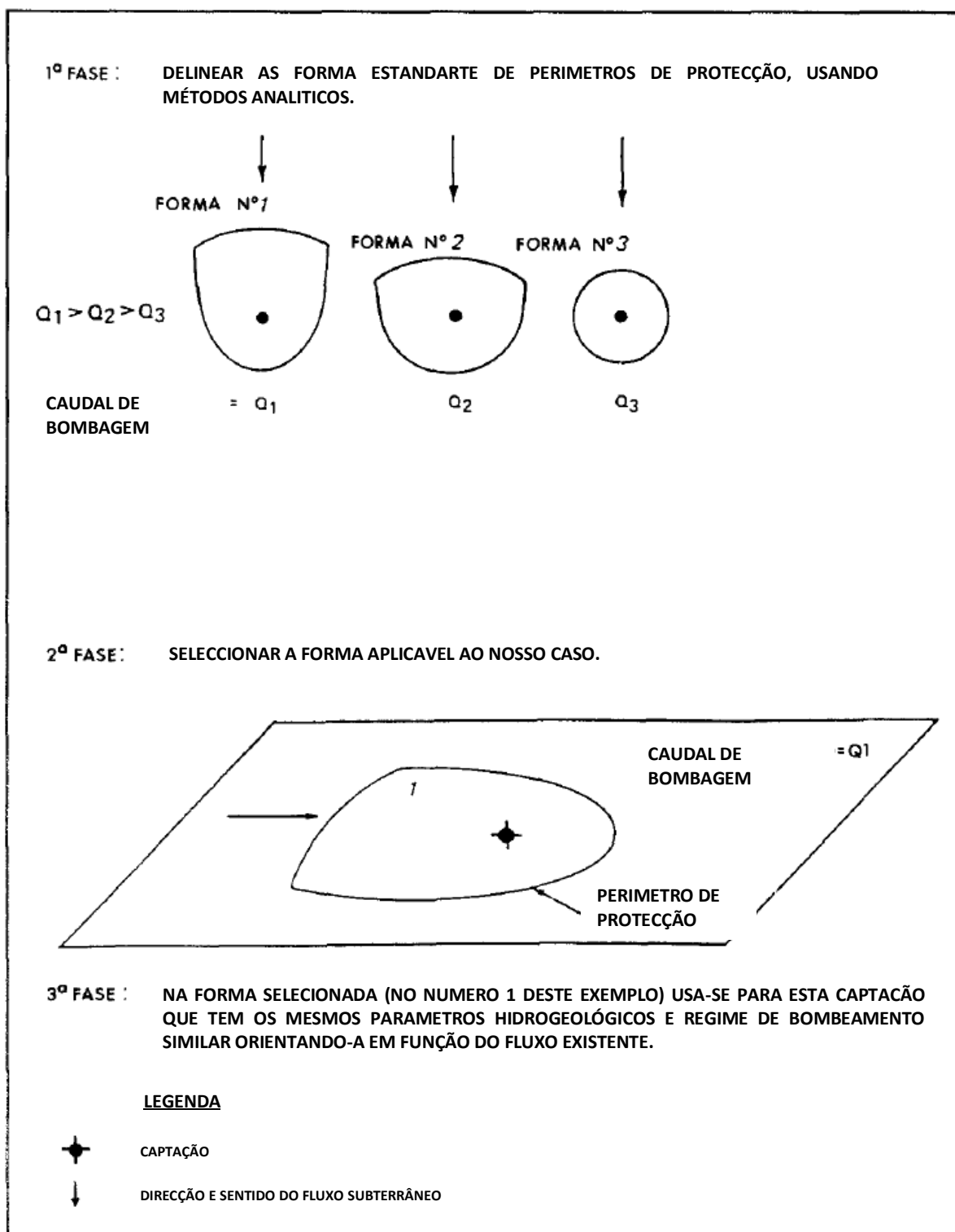
Figura 5.7 – Esquema de uma bombagem em meio poroso (Fonte: A. Lallemand, J. C. Roux, 1989).

5.2.2.8 – MÉTODO DAS FORMAS VARIADAS SIMPLIFICADAS

Este método faz uso de padrões simplificados de perímetros de protecção, obtidos através do recurso a métodos analíticos, onde se aplicam dois critérios fundamentais, tais como, fronteiras de fluxo e tempo de propagação (Moinante, 2003). Segundo esta autora, a forma da área de protecção utilizada é então orientada em torno da captação, de acordo com o padrão de fluxo hídrico subterrâneo, onde se calcula, inicialmente, a distância da captação até ao ponto neutro (a jusante), e também a extensão lateral das fronteiras de fluxo hídrico subterrâneo. Seguidamente, utiliza-se o tempo de propagação para determinar a sua extensão a montante da captação.

A aplicação deste método consiste na determinação da forma que melhor se ajusta à situação. Assim sendo, informações como: porosidade, condutividade hidráulica, transmissividade, etc., são muito importantes. Por exemplo, se estas propriedades forem uniformes em toda a área, as formas simplificadas são obtidas variando apenas o caudal de extracção. Se, ao invés, as características hidráulicas do aquífero variarem, é necessário utilizar diferentes combinações de parâmetros do aquífero e caudais de extracção. Apesar da relativa simplicidade do método, a sua eficácia diminui na presença de grandes heterogeneidades geológicas e de fronteiras hidrogeológicas não detectáveis.

A Figura 5.8 mostra um exemplo de aplicação de formas simplificadas.



Fuente: EPA, 1987

Figura 5.8 – Exemplo de utilização de formas variáveis simplificadas (Fonte: EPA,1987).

5.2.2.9 – MÉTODO DE KRIJGSMAN E LOBO FERREIRA

Aplicável a aquíferos livres, incidindo particularmente na zona de protecção intermédia definida na legislação portuguesa e cuja dimensão corresponde a um tempo de propagação de 50 dias, com um valor mínimo entre 40 e 280 metros, de acordo com o tipo de aquífero. Segundo Krijgsman e Lobo Ferreira (2001), são três as equações para o cálculo das três dimensões da zona de protecção intermédia de uma captação, a montante, a jusante e na perpendicular à direcção de fluxo:

$$x = 2.K.i = \sqrt{\frac{\pi.b.t}{Q.n}} \quad (21)$$

$$F = \frac{2.\pi.K.b.i}{Q} \quad (22)$$

Sendo:

K - condutividade hidráulica (m/d);

n - porosidade eficaz;

i - gradiente hidráulico (obtido a partir do nível freático);

b - espessura do aquífero (m);

Q - caudal de extracção ou produtividade média das formações (m³/d);

t - tempo de propagação (d).

Distância de protecção a montante:

$$r_{\max} = \frac{(0,00002.x^5 - 0,00009.x^4 + 0,015.x^3 + 0,37.x^2 + x)}{F} \quad (23)$$

Não devem ser utilizados parâmetros que conduzam a valores de x superiores a 18.

A distância de protecção a jusante é dada por:

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

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

A distância de protecção perpendicular à direcção de fluxo é da por:

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

Condições de aplicação : na equação do RFC substituindo t por 50 dias o que representa o valor máximo de rp, que ocorre no caso de gradiente hidráulico nulo.

Segundo Moinante *op. cit.*, este tipo de metodologia representa uma alternativa aos estudos hidrogeológicos detalhados referidos na legislação portuguesa, que se tornaram dispendiosos no caso de campos de captação individuais, fornecendo séries de variação para os perímetros das zonas de protecção.

Obviamente que se trata de um método com algumas limitações, e que requer para a sua aplicação, a exigência de determinadas simplificações do tipo:

- Ausência de anisotropias e heterogeneidades;
- Aquífero livre uniforme com base impermeável;
- Inexistência de fracturas e de trajectos preferenciais (apenas se admite porosidade primária);
- Valores constantes de k (permeabilidade) horizontal, espessura, porosidade, caudal de extracção;
- $K_{\text{vertical}} = 0,1 \times k_{\text{horizontal}}$;
- Fluxo e gradientes uniformes;
- Existência de ralos em toda a espessura do aquífero;
- Ausência de recarga;
- Inexistência de interferências de outras captações;
- Zona de protecção simétrica.

Em suma, o principal objectivo deste método é a produção dos resultados sob a forma de três mapas, em que cada um possa representar a zona de protecção para $t = 50$ dias.

Outros métodos para delimitação de perímetros de protecção estão citados em Moinante, 2003, porém de uso menos simples devido à diversidade de parâmetros exigidos.

5.2.3 – MÉTODOS GRÁFICOS

5.2.3.1 – MÉTODO DE ALBINET

Este método envolve o cálculo de curvas de rebaixamento em função da distância à captação, fazendo, para isso, o uso da fórmula de Theis para o regime transitório. Assim sendo temos:

$$d = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u) \quad (26)$$

$$u = \frac{l^2 S}{4 T t} \quad (27)$$

Sendo:

d – rebaixamento a uma determinada distância l da captação para um tempo t (m);

Q – caudal constante de extracção (m³/dia);

T – transmissividade (m²/dia);

S – coeficiente de armazenamento (adimensional);

$W(u)$ - função do poço (anteriormente referida);

t – tempo de propagação (dia).

Sendo conhecida a superfície piezométrica inicial, antes da bombagem, traçam-se as curvas de igual piezometria em redor da captação, em função do caudal de extracção, segundo a fórmula de Theis (Figura 5.9).

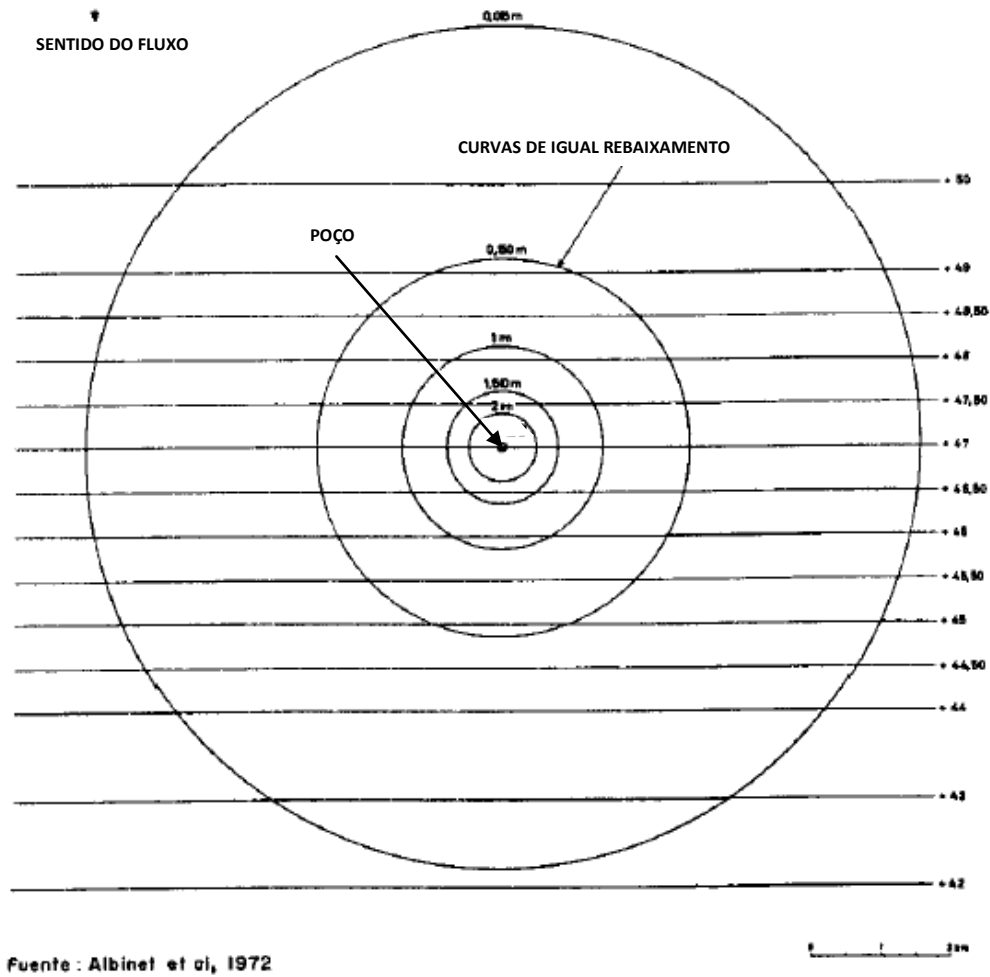


Figura 5.9 – Curvas de igual piezometria (Fonte: Albinet *et al*, 1972).

Os círculos de rebaixamento resultantes, intersectam as isopiezas (i.e. linhas que unem pontos de igual piezometria) anteriores às extracções, e nos pontos de intersecção são calculados os valores modificados de carga hidráulica. A partir desses pontos, faz-se o traçado das isopiezas de extracção e das linhas de fluxo perpendiculares (Figura 5.10), tornando-se possível deduzir o perímetro da zona de chamada da captação (Moinante, 2003).

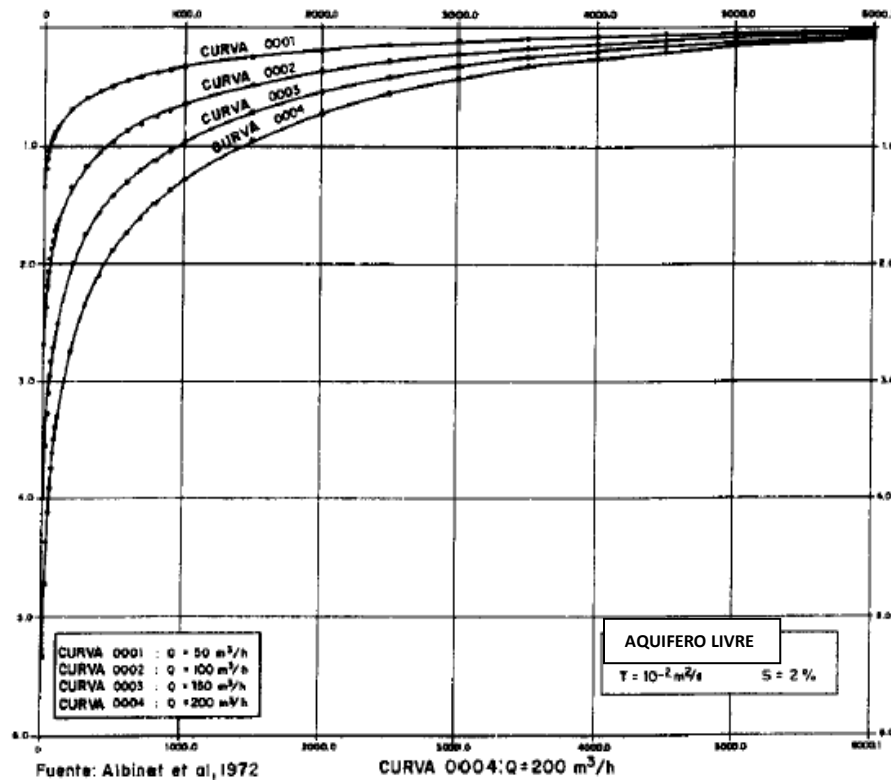


Figura 5.10 – Exemplo de curvas de distância piezométrica para um aquífero livre e caudal de bombagem de $200 \text{ m}^3/\text{h}$.

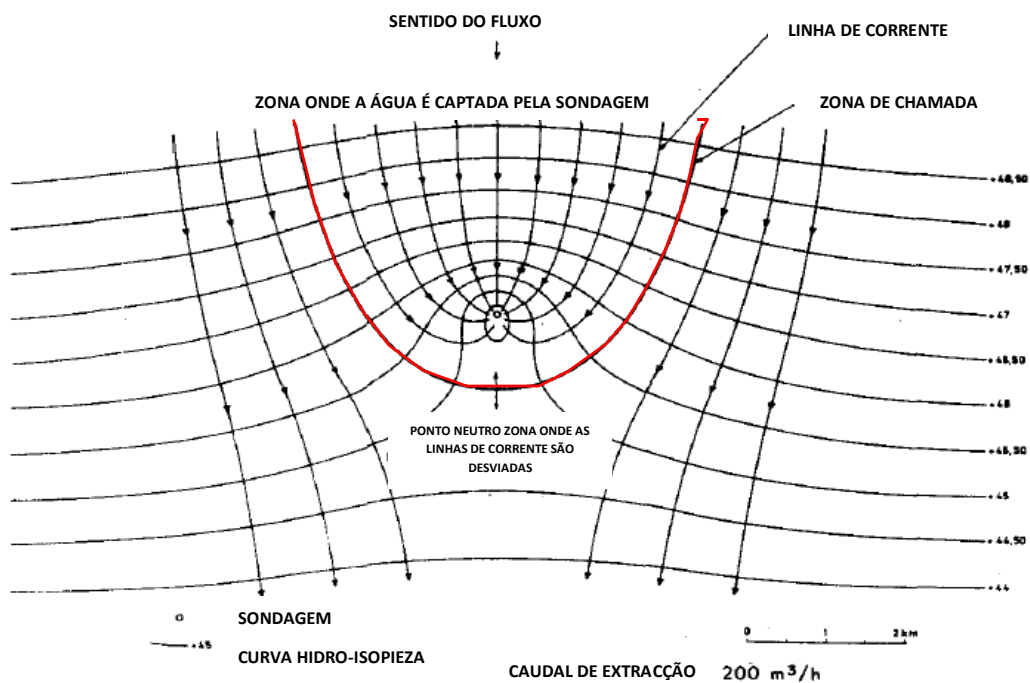


Figura 5.11 – Determinação da zona de chamada de uma captação (Fonte: Albinet *et al*, 1972).

5.2.3.2 – MÉTODO DE JACOBS E BEAR

Segundo Moinente, 2003, o método Jacobs e Bear é aplicável em casos onde existe uma única captação em aquífero homogéneo e isotrópico, de extensão infinita, e submetido a um gradiente regional uniforme. De acordo com a mesma autora, o presente método define um conjunto de isócronas com o recurso à seguinte expressão:

$$t_R = \frac{X_R}{10} - \frac{l}{\pi} \cdot \ln \left(\cos \pi \cdot \frac{Y_R}{10} + \frac{X_R}{Y_R} \cdot \sin \pi \cdot \frac{Y_R}{10} \right) \quad (28)$$

$$X_R = \frac{20 \cdot \gamma \cdot b}{Q} \cdot x \quad (29)$$

$$Y_R = \frac{20 \cdot \gamma \cdot b}{Q} \cdot y \quad (30)$$

$$t_R = \frac{2 \cdot T \cdot i \cdot t}{n \cdot Q \cdot b} \quad (31)$$

Sendo:

γ – velocidade de Darcy (m/h);

Q – caudal constante de extracção contínuo fictício (m³/h);

N – porosidade eficaz (a dimensional);

B – espessura do aquífero (m);

T – transmissividade (m²/h);

i – gradiente hidráulico (a dimensional);

Y_R, X_R, t_R - variáveis reduzidas;

t_r – tempo reduzido (h).

Partindo destes cálculos elabora-se um ábaco por um conjunto de curvas semelhantes a uma parábola, cada uma correspondendo a um determinado tempo de deslocação (Moinante, 2003).

Neste caso tanto as linhas de corrente como as linhas equipotenciais são mais completas do que no método anterior (Figura 5.12).

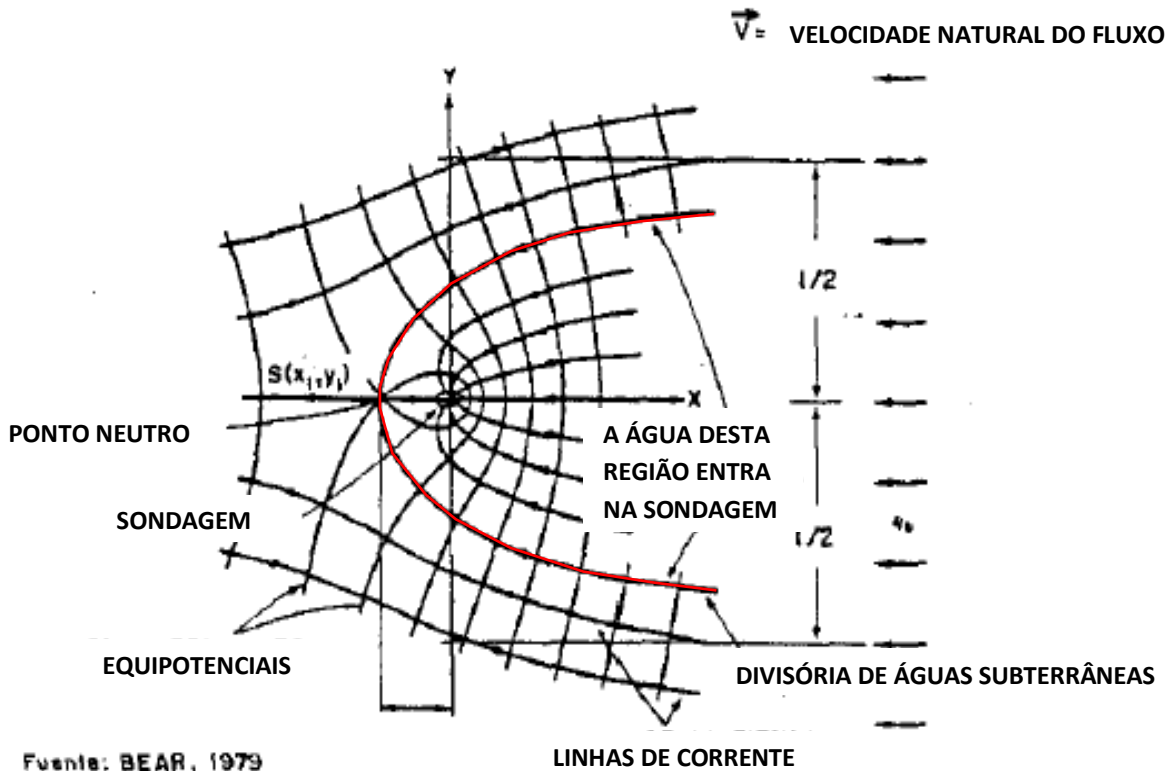


Figura 5.12 – Linhas de corrente em torno da captação (Fonte: Bear, 1979).

5.2.3.3 – MÉTODO DE SAUTY PARA UM ÚNICO POÇO

(Aquífero Homogéneo, Isótropo, de Extensão Semi-infinita Situado Próximo de um Curso de Água que Proporciona Alimentação Lateral)

Se considerarmos um determinado poço P situado a uma distância l de um curso de água, antes do início do bombeamento existe um fluxo regional para o rio. Se a distância l é suficientemente pequena, depois de um certo tempo após se ter iniciado o bombeamento, estabelecer-se-á um fluxo da ribeira para o poço causado pela depressão criada por este. Este fenómeno é conhecido como inversão do fluxo (ver Figura 5.13). Uma vez alcançado o regime permanente, é importante conhecer a taxa de alimentação proporcionada pelo curso de água assim como o tempo mínimo de trânsito entre este e o poço, já que num caso de uma hipotética contaminação do rio esta poderia acabar por afectar o poço.

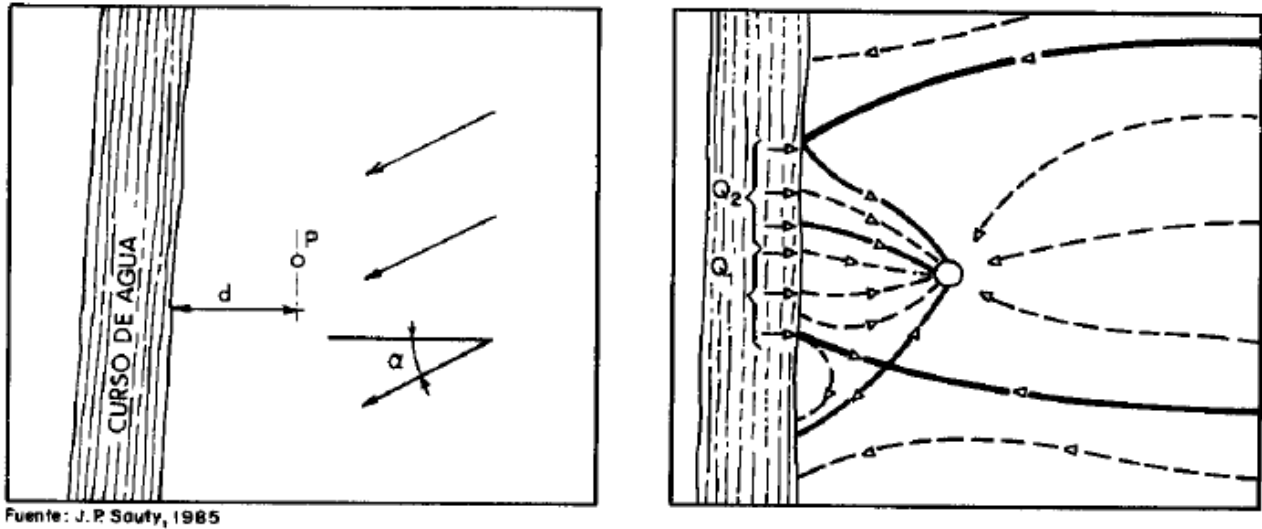


Figura 5.13 – Alimentação de uma bombagem nas proximidades de um curso de água (Fonte: J. P. Sauty, 1985).

Uma vez conhecidos estes dois parâmetros pode-se determinar tanto o grau de diluição que as águas contaminadas alcançariam no instante da extracção, como no momento de chegada ao poço.

Estes parâmetros dependem do caudal de bombeamento, da distância l entre o poço e o curso de água e do vector velocidade do fluxo subterrâneo, dado pelo seu módulo V e do seu desvio do curso de água.

Taxa de alimentação da ribeira em regime permanente

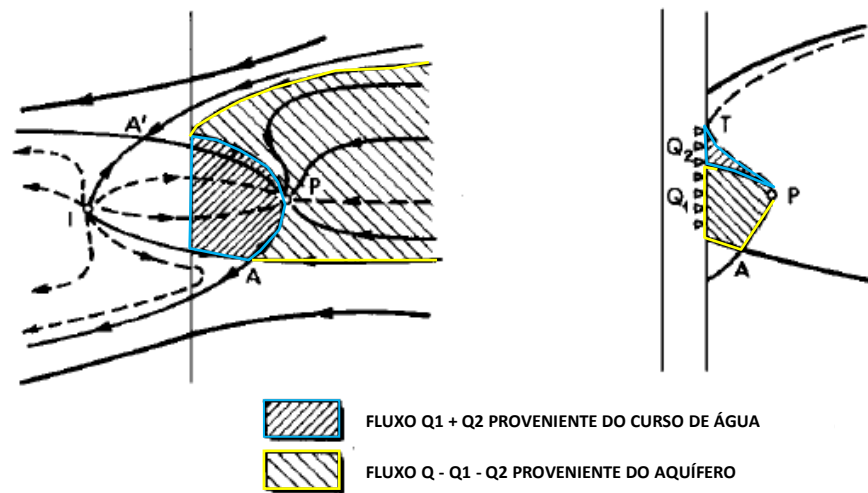
O ábaco da Figura 5.15 permite calcular a proporção q de água proveniente do curso de água, em função do ângulo α de “desvio” do fluxo e do parâmetro dimensional.

$$Q_R = \frac{Q}{b \sin \alpha}, Q_D = \frac{Q_R}{2\pi} = \frac{Q}{2\pi b \sin \alpha} \quad (32)$$

onde q é dado por:

$$q = \frac{Q_1 + Q_2}{Q} \quad (33)$$

(Ver figura 5.14)



Fuente: J.P. Sauty, 1985

Figura 5.14 – Diagrama de fluxos (Fonte: J. P. Sauty, 1985).

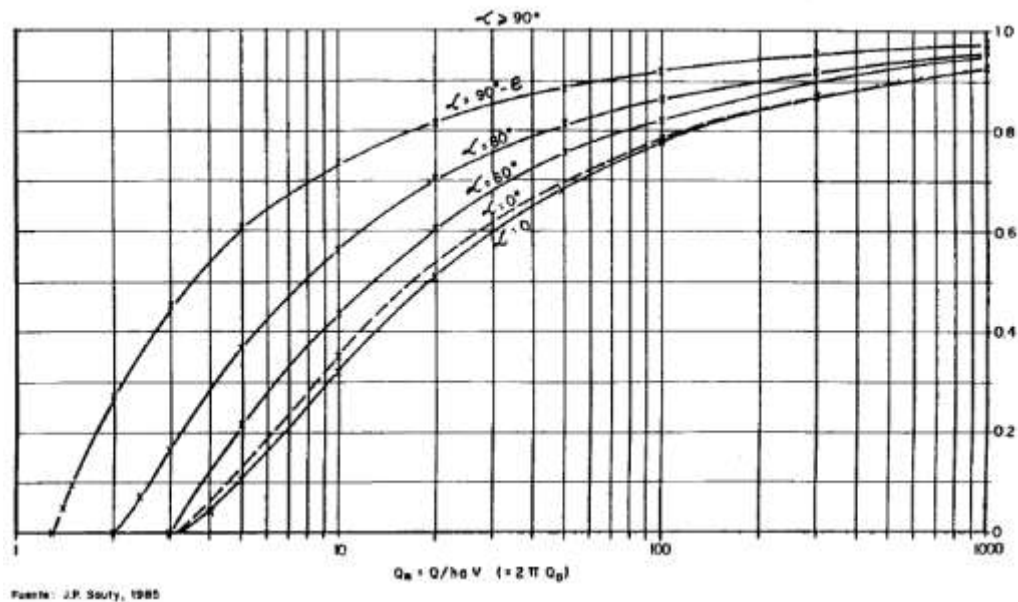


Figura 5.15 – Taxa de água bombeada proveniente do curso de água (Fonte: J. P. Sauty, 1985).

Cálculo dos tempos de chegada

O tempo de chegada t_p ou tempo de transporte ao longo da linha de corrente mais curta, entre o curso de água e o poço de bombeamento, representa o tempo mínimo necessário

para que uma possível contaminação do curso de água alcance o poço (supondo o caudal de bombagem constante).

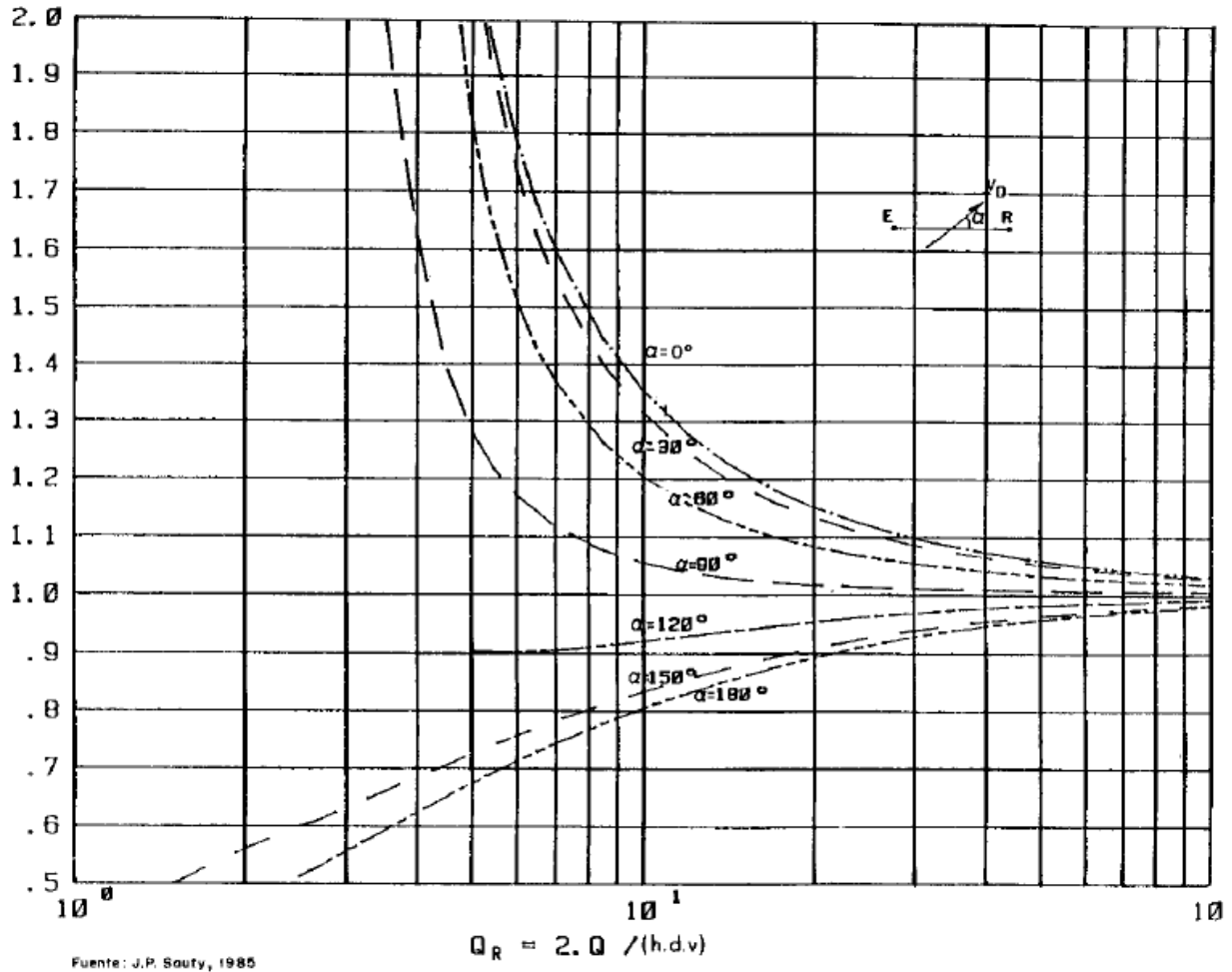


Figura 5.16 – Influencia do fluxo regional sobre o tempo de chegada em função de Q_R e de α . (Fonte: J.P.Sauty, 1985).

Através do ábaco da Figura 5.16 obtêm-se os tempos de chegada em função dos valores de:

$$Q_R = \frac{Q}{biv} \text{ com } Q_D = \frac{Q_R}{2\pi} \text{ e } \alpha \quad (34)$$

Por integração do vector velocidade obtêm-se:

$$t_p = \frac{2}{3} \frac{\pi m_s l^2 b}{Q} f(Q_R, \alpha) \quad (35)$$

O ábaco permite calcular os valores da função $f(Q_R, \alpha)$, calculando-se ulteriormente a partir da formula apresentada.

Regime transitório resultante da paragem do bombeamento. Caso de uma captação situada na proximidade de um curso de água contaminada

Quando uma captação se situa num aquífero aluvial com alimentação lateral que, na ausência de bombagem, é drenado para o rio (ver Figura 5.17). Apresentam-se aqui uma serie de ábacos obtidos por simulação numérica que permitem determinar:

- O tempo durante o qual o rio alimenta o aquífero após a paragem do bombeamento.
- A evolução dos caudais que penetram no aquífero durante esse período.
- O volume total de água do rio que penetra no aquífero durante esse período.

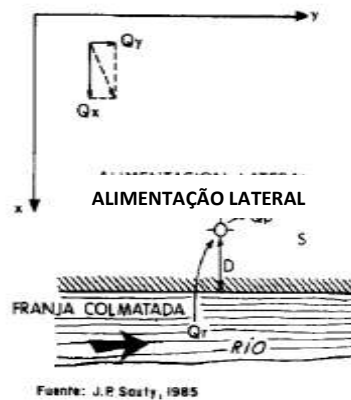


Figura 5.17 – Captação alimentada lateralmente por um rio (Fonte: J.P. Sauty, 1985).

Na Figura 5.18 é apresentado o exemplo de um dos ábacos da evolução do volume infiltrado no aquífero, para diferentes coeficientes de assoreamento do leito, após cessar o bombeamento.

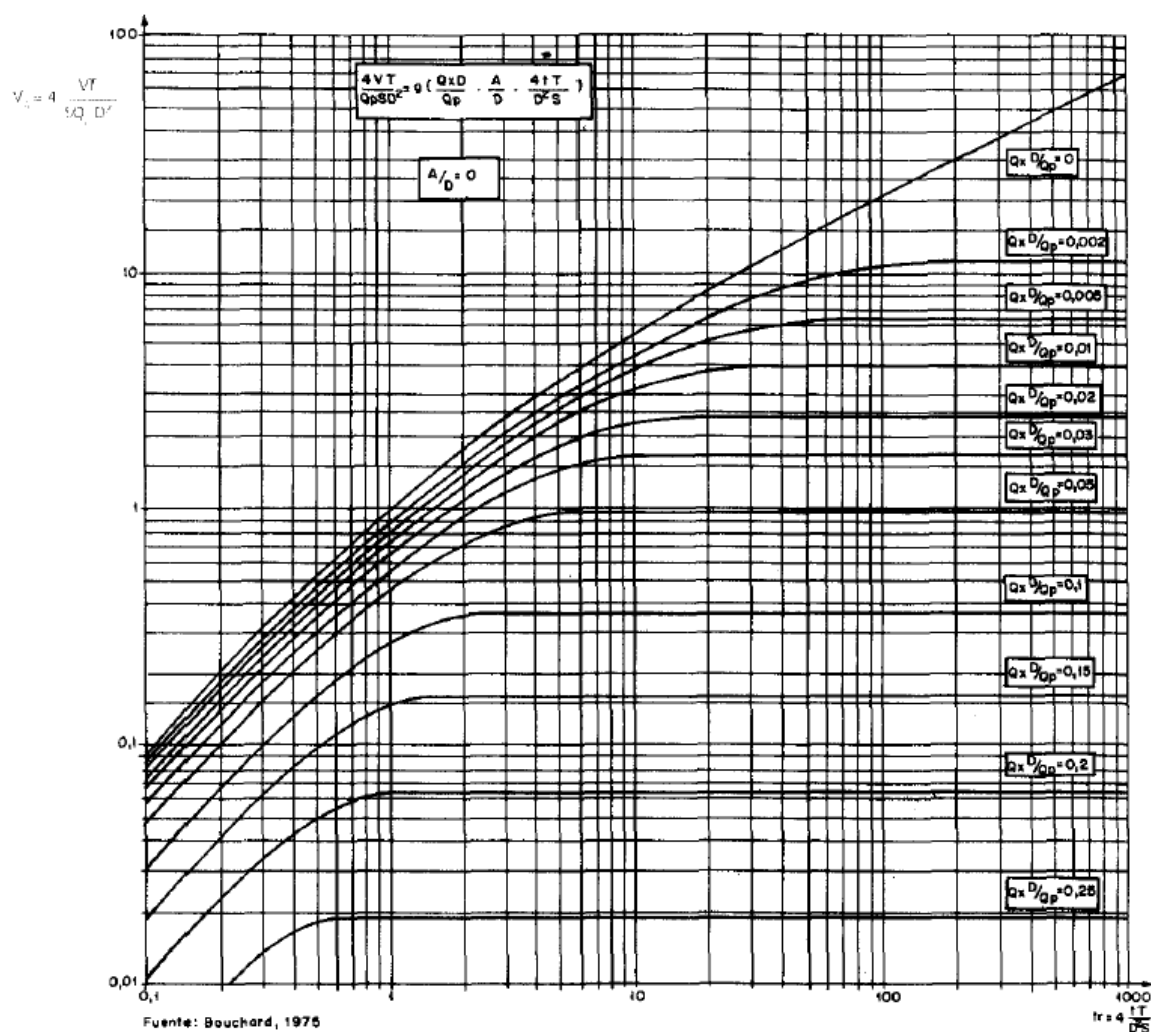


Figura 5.18 – Evolução do volume infiltrado na ausência de assoreamento ($A=0$) - (Fonte: Bouchard, 1975).

A Figura 5.19 representa a proporção de caudal bombeado que provem do rio em regime permanente, em função do grau de assoreamento do leito.

O tempo necessário para que se inverta o fluxo uma vez parado o bombeamento, representa o tempo de avanço mínimo necessário para detectar uma possível contaminação no rio antes que esta chegue às proximidades da captação.

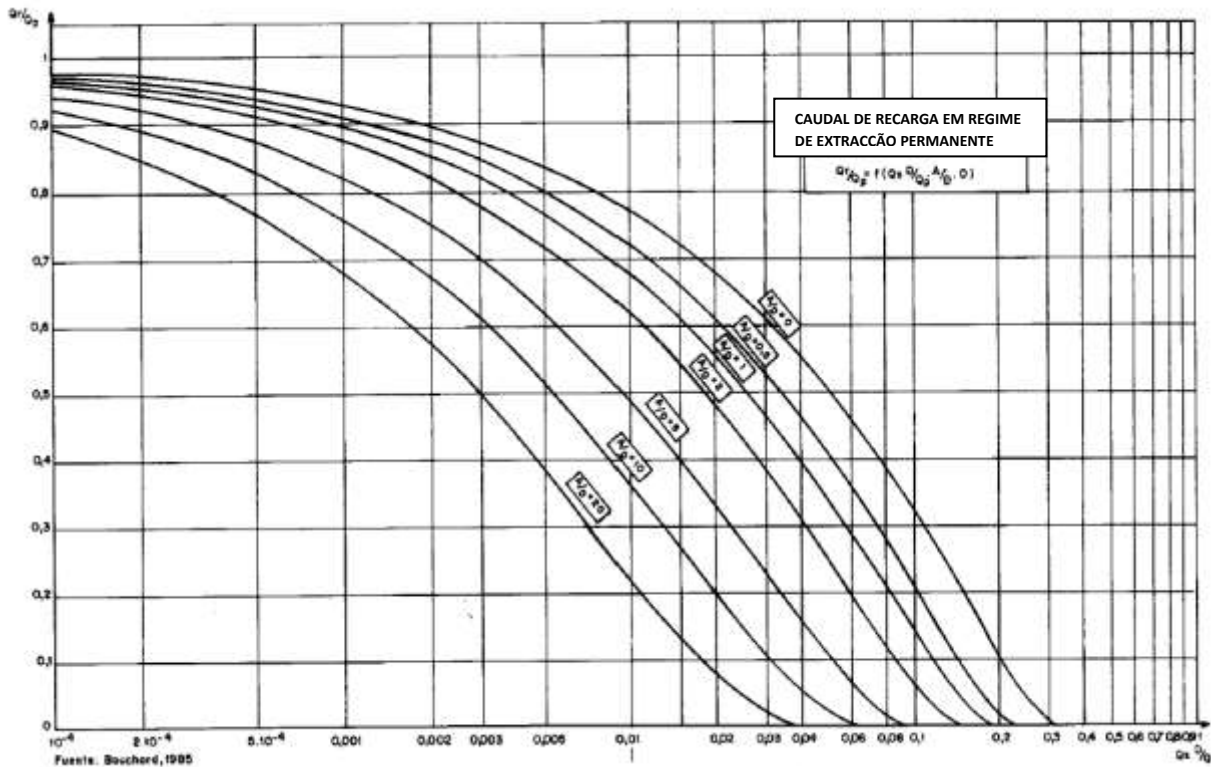


Figura 5.19 – Proporção de caudal extraído, proveniente do rio em regime permanente (Fonte: Bouchard, 1985).

5.2.3.4 – MÉTODO DE SAUTY PARA UMA BATERIA DE POÇOS EM LINHA

Neste método propõem-se aproximar a isócrona a uma série de rectângulos, (Figura 5.20), para os poços interiores e dos semicírculos para os poços extremo. A superfície global será fechada pelos segmentos de recta tangentes aos círculos.

O comprimento dos rectângulos é:

$$L = \frac{Q t_0}{m_s b d} \quad (36)$$

Sendo d a distancia entre duas captações vizinhas.

O raio do circulo é dado por:

$$R = \sqrt{\frac{Q t_0}{\pi m_s b}} \quad (37)$$

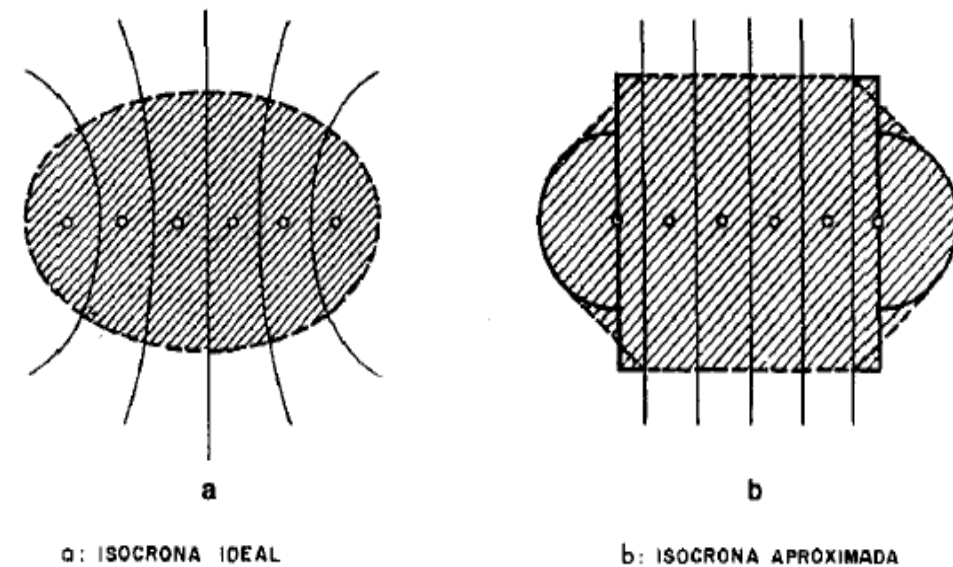
Há que ter em conta que o perímetro é calculado supondo que o fluxo é:

- entre poços, paralelo (perpendicular à linha dos poços); o volume de água representado por cada rectângulo é igual ao volume bombeado por um poço durante o tempo t_0 .

$$WLdb = Qt_0 \quad (38)$$

- no exterior, para metade do caudal dos poços periféricos, assimétrico em redor das sondagens; o volume de água representado por cada semicírculo é igual a metade do volume bombeado pelos poços dos extremos durante o tempo t_0 .

$$\frac{m_s \pi P}{2} = \frac{Qt_0}{2} \quad (39)$$



Fuente: J.P. Sauty, 1985

Figura 5.20 – Bateria de furos em linha (Fonte: J. P. Sauty, 1985).

5.2.3.5 – MÉTODO DO NOMOGRAMAS DE VAN WEAGENINGH E VAN DUIJENBODEN

Estes autores colocaram sobre a forma de nomogramas a forma de obter o tamanho das zonas de protecção. Para se poderem empregar é necessário conhecer a porosidade eficaz, infiltração, tempo de trânsito, caudal bombeado e espessura do aquífero.

Se supusermos que o caudal extraído de uma sondagem Q é igual à recarga do aquífero por infiltração I sobre uma superfície de raio L , tem-se:

$$Q = \pi L^2 I \quad (40)$$

A uma distância l da sondagem tem-se:

$$Q_1 = \pi(L^2 - P)I \quad (41)$$

Com uma superfície de alimentação do aquífero $A = 2\pi l b m_g$, a velocidade e a distância l e:

$$V = \frac{dl}{dt} = \frac{Q_1}{A} = \frac{(L^2 - P)I}{2l b m_g} \quad (42)$$

$$dt = \frac{2m_g b l dl}{(L^2 - P)I} \quad (43)$$

$$t = \frac{-m_g b}{I} \ln(L^2 - P) + cte \quad (44)$$

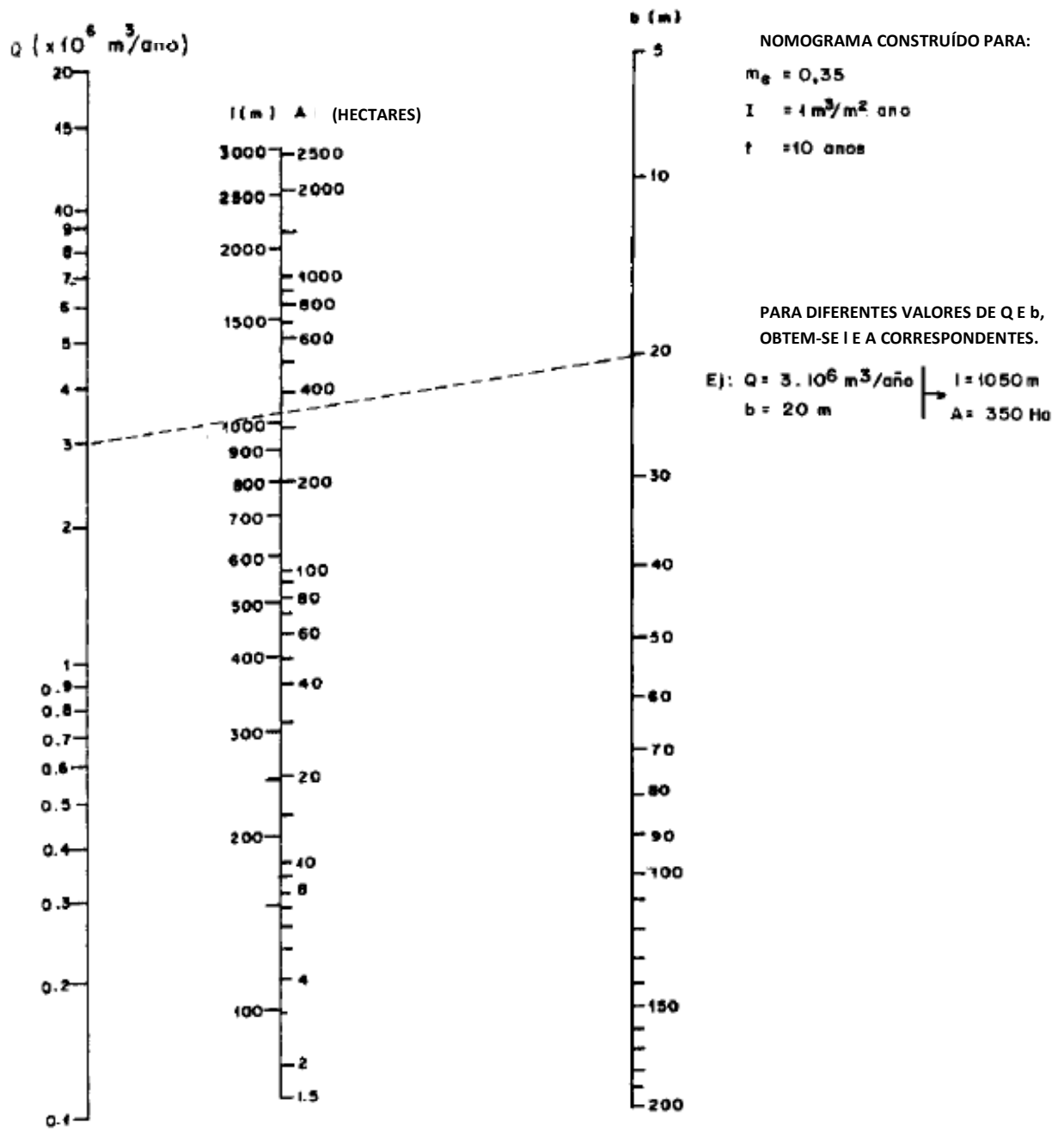
Para $l = 0$, e $t=0$ a constante vale: $\frac{m_g b \ln L^2}{I}$ e em consequência;

$$t = \frac{m_g b}{I} \ln \frac{L^2}{L^2 - l^2} \quad \text{Para } L^2 = \frac{Q}{\pi I}$$

$$t = \frac{m_g b}{I} \ln \frac{Q}{Q - l^2 \pi I} \rightarrow l = \sqrt{\frac{Q}{\pi I} (1 - \exp \frac{(-tI)}{b m_g})} \quad (45)$$

O nomograma da figura 5.21 mostra os valores para l e A em função de Q e b num aquífero livre com um tempo de transferência de 10 anos, uma porosidade eficaz de 935 e uma infiltração de $1\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$, os cálculos foram feitos a partir da equação (45).

Poderiam obter-se outros nomogramas variando os parâmetros que se fixaram para obter estes, por exemplo, o tempo de transferência, a porosidade eficaz, etc.



Fuente: A. Lallemand-Barrès, J.C. Roux, 1989

Figura 5.21 – Exemplo de aplicação dos nomogramas de Van Weagingen e Van Duijvenboden (Fonte: A. Lallemand – Barrès, J. C. Roux, 1989).

5.2.4 – MÉTODOS NUMÉRICOS

Como se verificou anteriormente, os modelos analíticos apresentam algumas limitações visto que, para facilitar a resolução das equações, é necessário efectuar algumas simplificações. O que provoca uma distorção da realidade originando condições homogéneas no interior do aquífero. Os modelos semi-analíticos oferecem informações relativas ao fluxo subterrâneo e ao tempo de propagação no espaço e no tempo, através de expressões numéricas ou analíticas. Estes dados são, efectivamente, bastante úteis na definição de perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas. Assim tornam-se mais flexíveis, incorporando ao mesmo tempo variações hidrogeológicas e pressões externas, sem que para isso seja necessário acrescentar informações (EPA, 1994). No entanto, na maioria das vezes, os aquíferos não são homogéneos e os seus contornos não são polígonos regulares, de modo que se torna difícil ou impossível obter-se uma solução analítica. Surgiram então os métodos numéricos onde as equações diferenciais do fluxo subterrâneo são resolvidas utilizando técnicas de aproximação numérica obtidas através de discretização do aquífero e da solução de um sistema de equações com incógnitas obtidas da discretização (Feitosa, 1997).

As ferramentas recentes que envolvem o elemento analítico, na modelação semi-analítica do fluxo hídrico subterrâneo regional, são flexíveis, pois não exigem aumentos significativos de informação.

Os modelos “puramente” numéricos apresentam-se matematicamente com maior complexidade que os anteriores, permitindo solucionar problemas também mais sofisticados. Para a sua aplicação, é necessário estabelecer uma malha sobre o sistema de água subterrânea em estudo, onde um conjunto de valores e parâmetros é atribuído em cada nó, escolhido aleatoriamente (como por exemplo, nível freático ou piezométrico, condutividade hidráulica, espessura do aquífero). Esta acção denomina-se discretizar. A malha constitui a base de uma matriz de equações a serem resolvidas. O programa permite a previsão das alterações que surgem ao longo do tempo, com base nas soluções desse sistema de equações (Moinante, 2003).

A utilização destes modelos justifica-se apenas nos casos em que existe informação suficiente para suportar as necessidades de dados do programa. Quando é necessário

estimar grandes quantidades de parâmetros, os modelos analíticos fornecem o mesmo nível de precisão (Moinante, 2003).

5.2.4.1 – MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS E ELEMENTOS FINITOS

Entre os métodos numéricos mais utilizados actualmente para a resolução de equações diferenciais, o método das diferenças finitas é o mais antigo e mais difundido entre os geólogos e engenheiros. Neste método, a região é aproximada por uma malha rectangular ou quadrada e os valores médios da piezometria são determinados nos pontos centrais da malha (Feitosa, 1997). Enquanto nos modelos baseados no método de elementos finitos, as células da malha podem ser elementos triangulares que se adaptam à localização das captações. Em cada célula da malha existe um balanço de massa que está relacionado com o balanço das células vizinhas. É gerada assim uma equação para cada célula. Com o modelo numérico, torna-se possível resolver estas equações simultaneamente a fim de que o equilíbrio seja alcançado (Feitosa, 1997).

5.2.4.2 – MÉTODO DO RASTREIO DE PARTÍCULAS

Segundo Mendonça (2005), a forma e a extensão das zonas de protecção delimitadas pelo método do rastreio de partículas associado a modelos de fluxo em diferenças finitas dependem da dimensão da célula onde se localiza o furo de captação a proteger. Tendo em conta os diâmetros usuais dos furos, para a delimitação correcta das zonas intermédia e imediata, aquela célula deverá ter cerca de 1 a 2 metros de lado. Nestas circunstâncias, é recomendado a utilização de uma malha telescópica. Também será desenvolvido um método baseado no princípio da sobreposição que permite calcular a dimensão dos eixos das zonas de protecção no caso de aquíferos com gradiente hidráulico uniforme.

A aplicação do método do rastreio de partículas (particle tracking method) em modelos de fluxo de diferenças finitas possibilita a delimitação de perímetros de protecção de captações de água subterrânea em aquíferos com condições de fronteira, de homogeneidade e de anisotropia, complexas. Estas técnicas são frequentemente

utilizadas em Portugal e há bibliografia portuguesa recente que trata deste tema (Feseker & Lobo Ferreira, 2001; Marques, 2002).

5.2.4.3 – MÉTODO DA SOBREPOSIÇÃO DOS GRADIENTES

Este método baseia-se no princípio da sobreposição e considera o movimento advectivo dos poluentes. O rebaixamento resultante da bombagem de um furo é independente do nível piezométrico (ou nível freático) inicial. O cone de rebaixamento resultante da extracção de água é calculado separadamente de acordo com as condições de fronteira. A superfície piezométrica final resultante da sobreposição do cone de depressão do furo à superfície piezométrica inicial.

Considera-se um aquífero confinado, homogéneo e isotrópico e com gradiente hidráulico constante. No aquífero localiza-se um furo de captação completo (podem ser tantos furos quanto se queira) onde se extrai um caudal constante. O sistema de eixos de coordenadas tem a origem no centro do furo, o eixo dos **Y** coincide com a direcção do gradiente hidráulico regional e o eixo **X** é perpendicular.

O escoamento resultante da extracção de água pelo furo, suposto que a superfície piezométrica é plana e horizontal, tem simetria radial e o valor do gradiente hidráulico tem expressão:

$$\frac{dh}{dr} = Q / (2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot r) \quad (46)$$

Onde r é a distância radial ao centro do furo.

O gradiente no aquífero que se pretende proteger pode ser escrito na forma vectorial:

$$\text{grad } h = \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) i + \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) j \quad (47)$$

Onde i e j são os vectores unitários nas direcções x e y .

No caso do gradiente regional uniforme segundo Y , da sobreposição resulta:

$$\text{grad } h_y = \left(i_0 \pm \left(\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot b \cdot K \cdot y} \right) \right) j \quad (48)$$

Ao longo do eixo do X será:

$$\text{grad } h_x = \pm \left(\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot b \cdot K \cdot x} \right) i + i_0 j \quad (49)$$

No caso do gradiente regional ser pequeno face ao gradiente produzido pelo furo, o que é frequente nas proximidades dos furos em bombagens:

$$\text{grad } h_x = \pm \left(\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot b \cdot K \cdot x} \right) i \quad (50)$$

Aplicando a Lei de Darcy

$$\gamma_x = \pm (Q) / (2 \cdot \pi \cdot b \cdot x \cdot n_e) \quad (51)$$

$$\gamma_y = \left(i_0 \pm \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot b \cdot K \cdot y} \right) (K/n_e) \quad (52)$$

Onde n_e é a porosidade efectiva e γ_x e γ_y são as componentes do vector velocidade média linear.

O tempo gasto para atingir a localização pode ser expresso como:

$$t(\rho) = t(\rho_0) + \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{1}{\gamma(\rho, t)} d\rho \quad (53)$$

Onde é o tempo gasto para atingir a posição.

Esta equação pode ser resolvida numa folha de calculo ajustando os valores de Δx ou Δy de acordo com a precisão desejada.

O método da sobreposição dos gradientes permite calcular as dimensões das zonas de protecção segundo a direcção a montante e a jusante do furo, na perpendicular, o ponto neutro ou de estagnação a jusante do furo ($\gamma_y = 0$) e a largura máxima da zona de chamada ($\gamma_y = i_0 \cdot (K/n_e)$).

A expressão utilizada no cálculo da dimensão perpendicular (segundo X) não é mais que a expressão da fórmula do Anexo do decreto-lei 382/99 (fórmula do raio fixo). Só é aplicável quando o gradiente hidráulico regional é desprezável face ao gradiente produzido pela bombagem no furo de captação.

Os modelos numéricos apresentam diferentes vantagens. Possuem flexibilidade de aplicação para diversos tipos de problemas e facilidades de modelação de contornos irregulares. Fornecem um elevado grau de exactidão, podendo ser aplicados a uma grande variedade de situações hidrogeológicas.

A utilização de modelos matemáticos para delimitação dos perímetros de protecção permite prever alterações de comportamento, a partir das variações nas condições para as quais foram calculados (por exemplo, caudal de extracção), ou eventuais impactos de origem natural. Isto remete, de um modo geral, a delimitação de áreas de protecção inferiores às obtidas por outros métodos (ITGE, 1991).

Torna-se evidente que a utilização dos modelos matemáticos é uma tarefa complexa, exigindo a participação de técnicos especializados e uma extensa quantidade de informação. Dai, os custos associados serem elevados, e consequentemente sua aplicação restringir-se à necessidade de grande exactidão de resultados, em função de problemas complexos, ou situações cujo perímetro proposto obriga a expropriações e indemnizações dispendiosas de terrenos (ITGE, 1991).

Podem ser referidos alguns programas informáticos que são concebidos especificamente para elaborarem os modelos numéricos hidrogeológicos, que servirão de base para a implantação de perímetros de protecção:

- O programa ASMWIN (Aquifer Simulation Model) – corresponde a um modelo bidimensional de fluxo e de transporte de águas subterrâneas;
- O programa WELLFLOW – é um programa que foi desenvolvido por Feseker e Lobo Ferreira (2001), com o objectivo de facilitar a delimitação de perímetros de protecção em aquíferos multicamada.

5.2.4.3 – MÉTODO DE FLUXO E TRANSPORTE DE MASSA

(Exemplo de aplicação para delimitação de perímetros de protecção)

Os perímetros de protecção podem ser calculados usando modelos matemáticos de simulação do fluxo de águas subterrâneas e/ou de transporte de solutos que resolvem numericamente as equações que os definem. Na Figura 5.22 mostra os passos que se devem seguir para os empregar. O modo de proceder consiste essencialmente em definir as hipóteses hidrodinâmicas que caracterizem o aquífero que vai ser modelado, elegendo em função das etapas e dos objectivos a obter, o modelo que se vai utilizar.

Uma vez realizada esta selecção deve escolher-se, em função do número de dados existente, que período vai ser utilizado como referência, e introduzir em cada uma das células, em que tenha sido descritizado, os parâmetros hidrológicos do aquífero.

A fase seguinte consiste em calibra-lo, e decidir, comprovar se os dados fornecidos coincidem com o existente no período de referencia escolhido, recorrendo quando assim não seja a dados complementares e/ou adaptando os que estão a ser utilizados. Ao concluir esta etapa deverá dispor-se de um modelo matemático que reproduza fielmente a realidade, podendo no entanto ser empregue na simulação várias hipóteses. Para este caso e em função dos critérios elegidos para a determinação do perímetro de protecção interessará definir a área em que se produzirá um certo rebaixamento, calcular as isócronas para diferentes tempos de trânsito, etc.

Quando se utiliza um modelo de qualidade o procedimento a seguir consiste apenas em realizar primeiro um modelo de fluxo, usando os dados disponíveis como entradas para poder assim resolver as equações da dispersão.

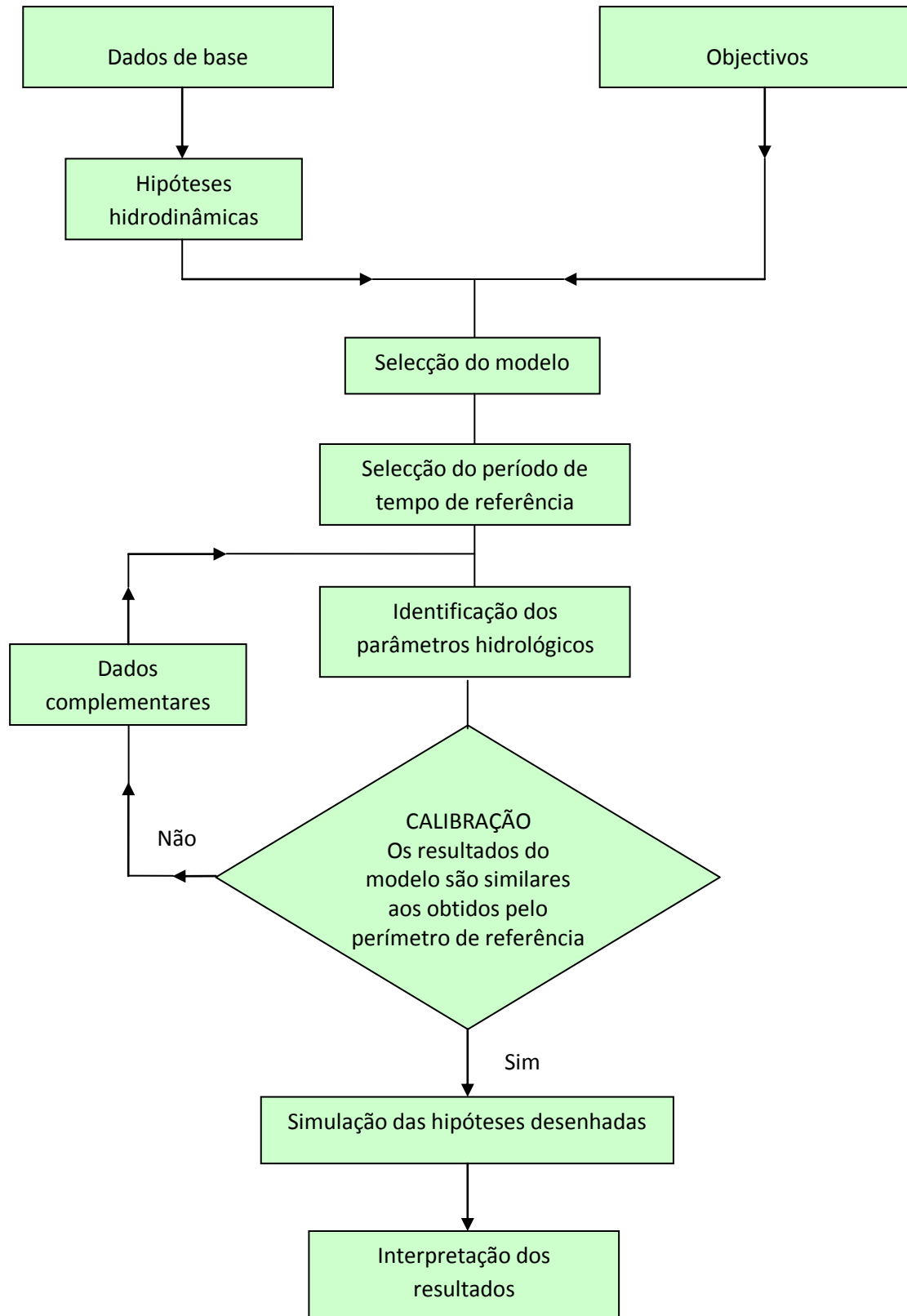


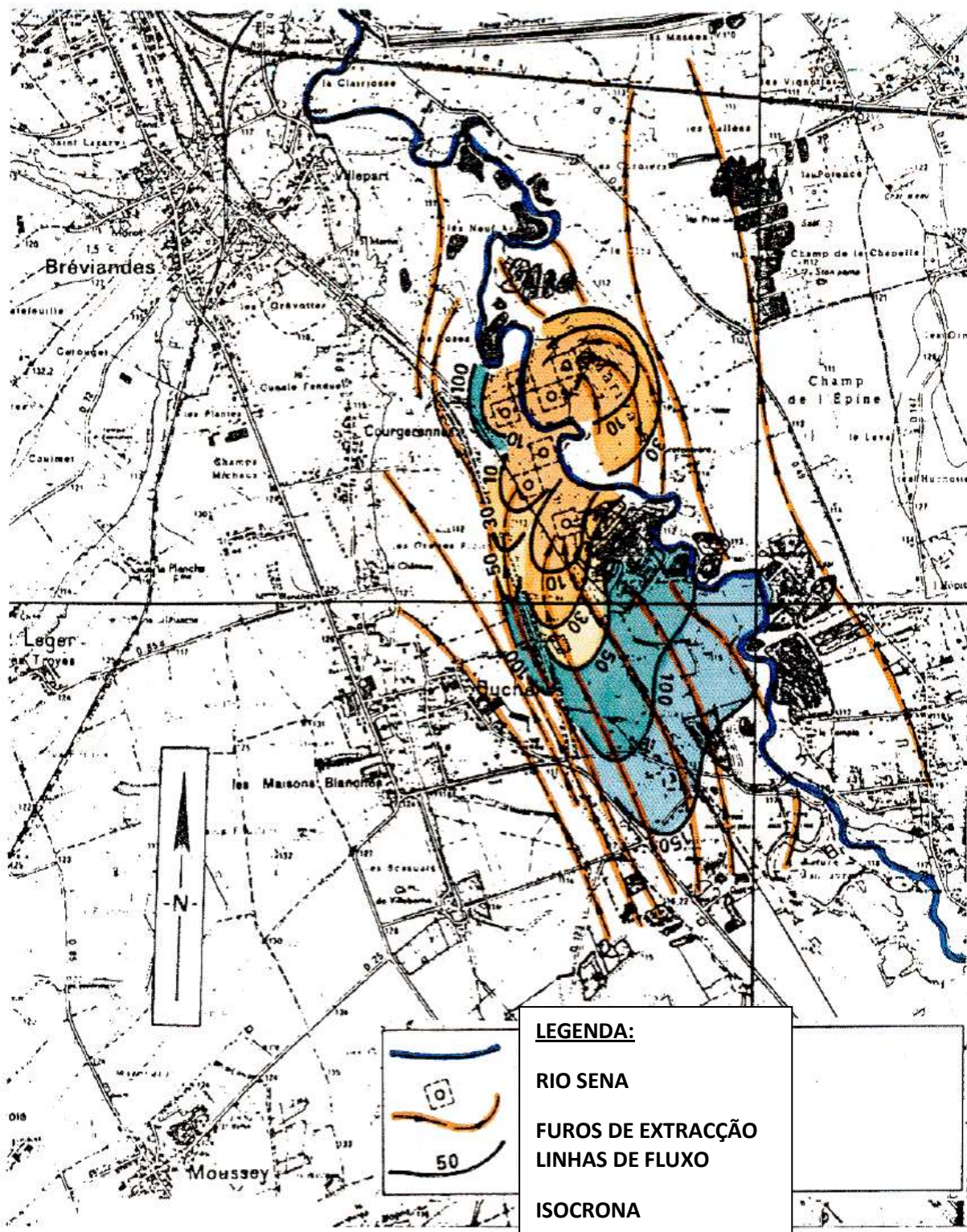
Figura 5.22 – Principais etapas da utilização de um modelo matemático.

Em relação à selecção do modelo é necessário realizar em primeiro lugar uma avaliação detalhada da qualidade e do tipo de dados de entrada disponíveis, no entanto a utilização de modelos muito complicados carece de sentido por exigirem um elevado número de parâmetros quando só se dispõe de dados fiáveis para um reduzido número de células.

O emprego de modelos matemáticos é especialmente útil para a determinação de perímetros de protecção quando existem limites de fluxo e condicionantes hidrogeológicas complexas, assim como para prever as possíveis variações de tamanho que será necessário realizar devido a variações em relação as condicionantes com que foi calculado, tais como o aumento dos bombeamentos, etc., proporcionam resultados com um elevado grau de exactidão.

Nalguns países combina-se o uso de métodos analíticos na proximidade das captações e modelos numéricos para definir a extensão total do perímetro. Isto deve-se ao facto de os primeiros serem mais precisos na imediação da captação se a baixa densidade espacial dos dados não permitem estabelecer uma malha suficientemente pequena.

Um exemplo de aplicação dos modelos matemáticos para a determinação de protecção é dado por Moreau e P. Morfaux (1989). Trata-se de um local de sondagens para o abastecimento público, que constitui um caso complexo, uma vez que existem vários poços muito próximos a efectuar captações de água o que faz com que se unam numa relação intensa entre o rio e o aquífero (Figura 5.23).



Fuente: A. Lallemand-Barrés, J.C. Roux, 1989

Figura 5.23 – Aplicação de um modelo de fluxo e qualidade para a determinação de um perímetro de protecção em Troyes e em Mogne (França)- (Fonte: A. Lallemand – Barrés, J.C. Roux, 1989).

A formação aquífera é constituída por uma camada de 2 a 5 m de cascalho sobre as quais assentam 2 a 3 m de lodo argiloso. O cascalho forma um excelente aquífero normalmente em carga, passando a ser um aquífero livre depois de intensos períodos de bombeamentos. No estado natural, o aquífero era drenado pelo rio Sena, excepto nas proximidades dos principais reservatórios. O rio tem um papel de barreira hidráulica e de limite de alimentação ao bombeamento, com um desfasamento relacionado com o assoreamento do leito. É também a principal via de entrada de contaminantes a alimentar o aquífero com possíveis substâncias externas provenientes das águas de escorrência das vertentes.

O esquema de exploração escolhido corresponde ao que coloca em funcionamento todas as obras de abastecimento na zona em estudo. Desta forma obtiveram-se quadros em que se pode ver o tempo que demoraria um contaminante a chegar a um determinado poço em função da origem da poluição. Foi também efectuada uma planta das curvas isócronas de 10 e 30 dias de propagação da frente de contaminação.

5.2.5 – OUTROS MÉTODOS

5.2.5.1 – MÉTODO DE HORSLEY

A obtenção do perímetro de protecção com base neste método realiza-se em três etapas sendo, a segunda delas, uma aplicação do modelo prismático de Shahler.

1ª Fase

Pretende-se obter a distância a que se encontra o fluxo de água subterrânea e onde se encontra a divisória do fluxo da mesma mediante um método gráfico que utiliza os rebaixamentos dos níveis piezométricos à medida que se afastam da captação.

O modo de proceder aparece reflectido na Figura 5.24. A curva A apresenta a variação do nível piezométrico, antes do início do bombeamento, ao afastar-se da captação. A curva B indica o cone de bombeamento que se produz ao redor da mesma por efeito das extracções.

Através da soma de ambas as curvas, obtêm-se a curva C que indica até onde deve estender-se o perímetro de águas subterrâneas. Para isso basta ver no eixo dos X a que distância da captação está o ponto de inflexão da curva C.

2ª Fase

O objectivo é delimitar a extensão do perímetro de águas subterrâneas.

Para isso é necessário calcular que proporção existe entre a capacidade de recarga do aquífero que drena para a captação e a espessura saturada total do mesmo.

Aplicando a mesma proporção à distancia existente até à divisória hidrogeológica das águas subterrâneas da captação, obtendo-se a extensão do perímetro nessa direcção.

3ª Fase

Nesta última fase da determinação do perímetro de protecção só falta conhecer a zona a incluir, visto que se calculou previamente qual é a extensão das águas subterrâneas da captação.

Esta pode obter-se calculando a área necessária para obter o caudal extraído pela sondagem em funcionamento e a recarga existente. Para isso emprega-se:

$$V = lA \rightarrow A = \frac{V}{l} \quad (54)$$

Sendo:

V - volume extraído durante um período de tempo t .

l – volume infiltrado por unidade de superfície durante o tempo t .

A – área de infiltração.

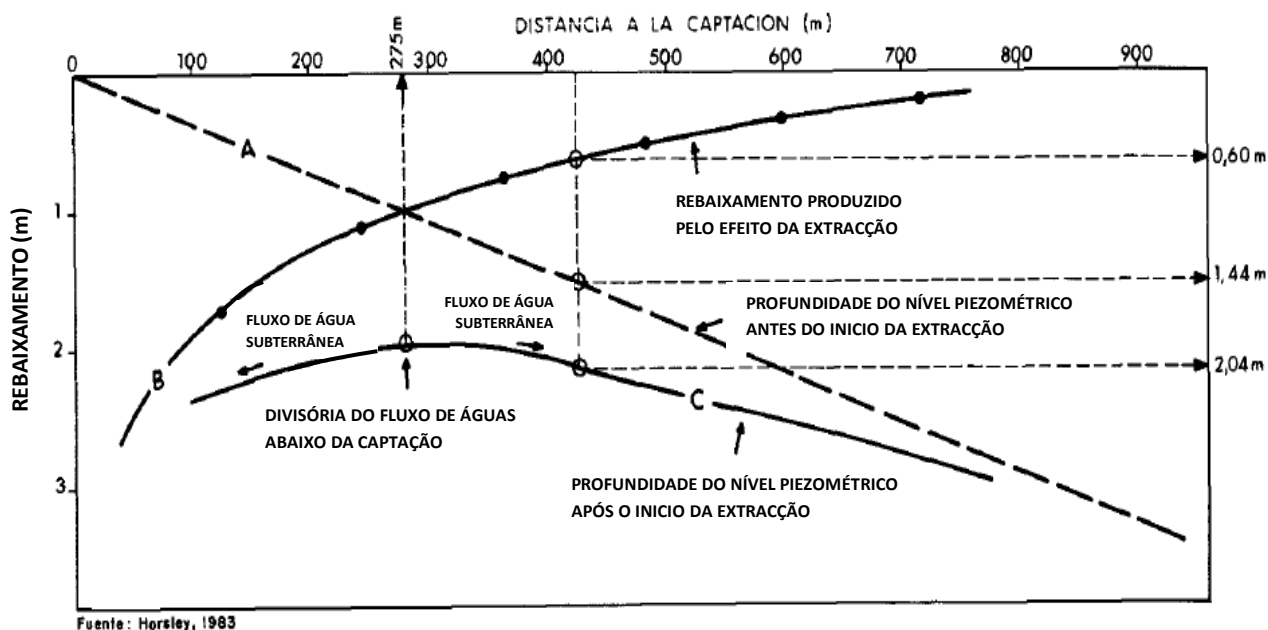


Figura 5.24 – Determinação da divisória do fluxo da captação. Águas subterrâneas com o mesmo sentido do fluxo. Caso de aplicação de Massachusetts (Fonte: Horsley, 1983).

5.2.5.2 – UTILIZAÇÃO DE TRAÇADORES (MÉTODO HIDROGEOLÓGICO)

No caso específico da delimitação de perímetros de protecção, o objectivo dos ensaios com traçadores consiste em saber se a partir de determinado ponto de água um poluente poderá atingir, ou não, a captação a estudar, e se tal se verificar, quanto tempo demorará para que isso aconteça (Moinante, 2003).

A mesma autora refere que o presente método assume grande importância quando se reporta a zonas de protecção especial a definir em aquíferos cársicos ou fracturados, e as substâncias (traçadores) utilizados podem ser naturais ou artificiais.

1. Traçadores artificiais

A utilização de traçadores artificiais consiste essencialmente na introdução de uma quantidade conhecida de uma determinada substância (traçador) no sistema de água subterrânea a ser estudado (método mais antigo). A injeção do traçador pode ser

efectuada num ponto de água ou numa linha de água que aflua na direcção do aquífero, que se pensa abastecer a captação para a qual se pretende definir o perímetro de protecção (nas zonas cársticas e fracturadas os traçadores utilizados podem ser naturais ou artificiais).

2. Traçadores naturais

Correspondem a substâncias que ocorrem naturalmente, ou não na água, pois também se consideram os de origem antropogénica. De qualquer modo, os traçadores naturais mais importantes são os constituintes químicos naturais da água, bem como o seu conteúdo isotópico (Kass, 1998). Entre estes isótopos podem destacar-se: hidrogénio, oxigénio, deutério e trítio radioactivo.

5.3 - ESCOLHA DO CRITÉRIO E MÉTODO A ADOPTAR

A escolha do ou dos critérios a adoptar na delimitação de perímetros de protecção obriga a uma avaliação preliminar baseada em considerações técnicas, socioeconómicas ou políticas. Em geral as considerações técnicas podem relacionar-se com maior ou menor facilidade da aplicação ou quantificação de determinado critério no qual se baseia o grau de adaptabilidade a alterações, facilidade de verificação no local, concordância com o modelo hidrogeológico escolhido ou capacidade de incorporação de processos físicos que afectem o controlo do transporte de poluentes. No entanto é do consenso geral que o melhor critério de avaliação, consiste nos que se baseiam no tempo de propagação. A Tabela 5.3 mostra uma forma de selecção em função da análise dos vários aspectos técnicos.

A correcta selecção reveste-se de especial importância uma vez que é substancialmente determinante nas características espaciais do perímetro. Para a aplicação prática do critério há que empregar-se um ou vários métodos descritos de forma teórica e prática nos pontos anteriores, sendo necessário para a sua selecção tanto as considerações de carácter técnico e económico, como a evolução do impacto social devido à implantação do perímetro de protecção.

Na Tabela 5.4, relacionam-se os critérios para determinação dos perímetros de protecção com os métodos que permitem a sua aplicação, e nas colunas do tipo de material é analisada a adequação de cada um deles às características do aquífero (meios porosos ou similares e fissurados).

Em aquíferos cársicos, os estudos e sobretudo as explorações tem permitido constatar que a delimitação de aquíferos cársicos, habitualmente utilizada, resulta em imprecisão, uma vez que engloba aquíferos muito díspares no seu comportamento. Existe uma variedade de graduações, com numerosos estados intermédios, entre os que funcionam de forma similar aos aquíferos porosos, onde se pode aplicar a lei de Darcy, até aos que onde a água circula por uma autentica rede hidrográfica subterrânea.

Tabela 5.3 – Valorização dos critérios utilizados na delimitação dos perímetros de protecção em função de considerações técnicas (baseado de fonte EPA, 1987).

Considerações Técnicas	Facilidade de aplicação	Facilidade de classificação	Facilidade de adaptação a mudanças	Facilidade de verificação	Capacidade de considerar o poder auto-depurador do terreno	Concordância com o modelo hidrogeológico geral	Capacidade de considerar processos físicos	Classificação de 1 a 5
Critérios	B/M/A	B/M/A	B/M/A	B/M/A	B/M/A	B/M/A	B/M/A	
Distância	A	A	A	A	N/A	B	B	1
Rebaixamento	M	A	B	A	N/A	A	B	2
Tempo de propagação	M	M	B	B	M	A	A	5
Critérios hidrogeológicos	M	N/A	A	A	N/A	N/A	M	3
Poder auto-depurador do terreno	B	B	A	B	A	N/A	M	3

B: Baixo

M: Médio

A: Alto

N/A: Não se aplica

Nota:
Classificação 1 a 5

1 Pontuação mínima
5 Pontuação máxima

O diferente funcionamento observado nestes aquíferos deve-se às variações na sua estrutura, ao regime hidráulico e à capacidade de armazenamento de água, pelo que a

análise minuciosa destes aspectos torna-se básica para a selecção da metodologia de estudo que se deve aplicar. Numa primeira análise pode aceitar-se que:

- Existem Meios em que o armazenamento na matriz rochosa é praticamente inexistente, carecem de continuidade hidráulica e de saturação na sua generalidade. Nos quais a água proveniente da recarga circula por uma rede hidrográfica bem hierarquizada que se estabelece no maciço rochoso.
- Por último existem outros meios intermédios nos quais as microfissuras, porosidade intergranular, etc., têm funções de armazenamento enquanto a drenagem se realiza através de condutas (fracturas, zonas alargadas de descontinuidade, juntas de estratificação, contactos com a erosão, etc.).

Tabela 5.4 – Critério empregue nos diferentes métodos de delimitação de perímetros de protecção (adaptado de fonte EPA, 1987)

							Tipo de materiais		
Método/Critério			Distância	Rebaixamento	Tempo de propagação	Critérios hidrogeológicos	Poder auto-depurador	Porosos e similares	Cársicos e fissurados (propriamente ditos)
Métodos geométricos	Raio fixo arbitrário		X					X	X
Métodos analíticos	Lei Darcy	Em função do tempo			X			X	
		Em função do rebaixamento		X				X	
	Raio fixo calculado	Em função do tempo			X			X	
		Em função do rebaixamento		X				X	X
	Kreitle e Senger				X	X		X	
	Fluxo entre Aquíferos					X		X	
	Fluxo Uniforme			X	X			X	
	Equação Equilíbrio Thiem			X				X	
	Hoffman e Lillich			X	X			X	
	Wyssling			X	X			X	
	Formas Variadas Simplificadas			X	X			X	
	Krijgsman e Lobo Ferreira		X					X	X

Continua...

...Continuação

...Continuação							Tipo de materiais		
Método/Critério			Distância	Rebaixamento	Tempo de propagação	Critérios hidrogeológicos	Poder auto-depurador	Porosos e similares	Cársicos e fissurados (propriamente ditos)
Métodos gráficos	Albinet			X				X	X
	Tempo de propagação por ábaco	Sauty e Tyer Jacobs e Bear			X			X	
				X			X		
	Nomogramas de VW e VD Nomogramas de Pettyjon				X X			X X	
Métodos numéricos	Diferenças Finitas			X				X	X
	Rastreo de Partículas				X	X		X	X
	Sobreposição de Gradientes			X	X			X	
	Modelos de fluxo e transporte			X	X	X		X	X
Métodos hidrogeológicos	Hidrogeológicos					X		X	X
Outros métodos e técnicas complementares	Renise						X	X	
	Horsley		X	X				X	X
	Traçadores				X	X	X	X	X
	Tritio				X		X	X	X

Os modelos referidos constituem de certo modo os dois grandes grupos de aquíferos carbonatados descritos na literatura anglo-saxónica. Define os sistemas de fluxo difuso e de fluxo em condutas, com fronteira não definida mas gradual. No Quadro 5.5 estão referidas as principais características que os definem.

Tabela 5.5 – Características dos dois tipos básicos de aquíferos carbonatados
(Fonte: Bayó Dalmau, A. *et al*, 1986).

	Aquíferos Cársicos (propriamente ditos)		Aquíferos de fluxo difuso
COMUNS	Meio muito heterogéneo	AQUÍFEROS INTERMÉDIOS	Meio relativamente homogéneo
	Rochas impermeáveis coexistindo com grandes condutos		Grande armazenamento
	Armazenamento pequeno ou nulo		Piezometria continua
	Piezometria virtual, descontínua		Fluxo difuso
	Circulação por condutos e rios subterrâneos. Pequenos aquíferos isolados		Estes hidrogramas são linhas rectas quando não se produzem precipitações
	Hidrograma de descargas, com coordenadas semilogarítmicas apresentam "picos" e zonas planas		Infiltração uniforme
	Infiltração em pontos localizados		Regulação natural importante
	Regulação natural escassa		Oscilações e gradientes regulares. Água inicialmente a pouca profundidade
	Grandes oscilações piezométricas, nível de água profunda		Formas cársicas escassas, inacessibilidade ao maciço
FREQUENTES	Formas cársicas abundantes, fácil acessibilidade ao interior do maciço		A regulação pode ser aumentada de forma significativa
	A regulação é dificilmente aumentada através das captações subterrâneas		

Tem-se aplicado o método de Wyssling, Jacobs e Bear em aquíferos calcários do levante Espanhol, comprovando-se mediante estudos complementares a idoneidade dos perímetros definidos. A aplicação dos métodos inicialmente aplicados aos meios porosos em determinados aquíferos carbonatados (aquíferos de fluxo difuso), com garantia de proteger adequadamente o recurso hídrico, tem sido posto de parte na determinação de diversos perímetros de protecção em zonas calcárias no sul de Inglaterra, onde é muito utilizado as fórmulas simplificadas com resultados satisfatórios.

A escolha do método a adoptar pode basear-se em aspectos relacionados com a população abastecida pela captação, questões técnicas, económicas e políticas.

População abastecida – quanto maior o número de habitantes abastecidos pela captação mais se justifica a utilização de métodos onerosos e sofisticados.

Considerações técnicas – prendem-se com a facilidade em aplicar a metodologia proposta. Poderão obrigar à requisição de técnicos especializados e a maior especificidade no tipo e quantidade de dados necessários, meios informáticos ou outros.

Considerações económicas – custos envolvidos na recolha dos dados, na caracterização hidrogeologia e hidroquímica, nos recursos humanos, em termos de impacto social e económico resultante da aplicação do perímetro.

Considerações políticas – têm a ver com a sensibilidade para a aplicação do determinado pelos métodos no tocante às restrições impostas para uso do território. Muitas vezes questionáveis as razões por dificuldades em compreender os princípios do método por pessoas não especializadas. Os limites devem ser definidos com clareza, através de um processo robusto, ou seja, com um bom suporte técnico e científico, para facilitar a sua defesa e evitar situações de conflito.

5.3.1 - CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS

Na Tabela 5.6 é apresentada a relação existente entre os diferentes métodos e algumas considerações técnicas como sendo:

- A facilidade de aplicação, onde se tem em conta tanto a necessidade de evitar os técnicos especializados, como de apoio informático, quantidade e tipo de dados necessários, etc.
- Complexidade dos dados necessários, avaliando se é possível obter os dados a partir de um estudo hidrogeológico geral, de uma base de dados ou de estudos preexistentes ou se é necessário realizar ensaios de bombeamento, análise piezométrica, etc.

Tabela 5.6 – Selecção do método com base em considerações técnicas.

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

(1) Gradiente hidráulico baixo e/ou sem limite de fluxo em redor da captação.

(2) Gradiente hidráulico alto e/ou com limites de fluxo em redor da captação.

- Adaptabilidade do modelo hidrogeológico regional, ou seja, em que nível o método empregue considera a singularidade de cada caso adaptado a ele, explicando qualquer situação particular que possa surgir, ou se é possível generalizar ou extrapolar a outras similares.

Para se avaliar correctamente a precisão dos diferentes métodos é muito interessante compará-los com um caso onde a abundância de informação sobre os parâmetros hidrogeológicos permitiu a sua aplicação. Onde se tem certezas da sua elevada precisão.

No caso de se utilizarem métodos tecnicamente mais fiáveis, como podem ser considerados, em alguns casos, os modelos numéricos como padrão, devem ser analisadas as diferenças que apresenta em relação aos outros métodos.

Na Tabela 5.7 é feito o resumo do resultado de um trabalho deste tipo realizado pela EPA, na EU. Com base no perímetro de protecção proposto para três captações, onde foi possível calibrar com precisão um modelo numérico, que se considerou como padrão para comparações efectuadas com outros métodos.

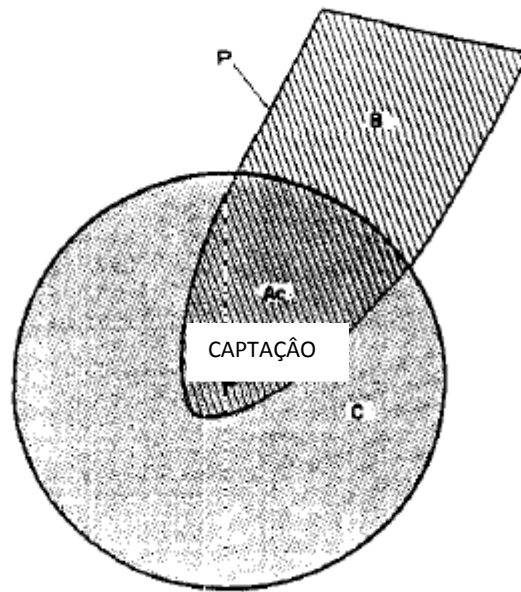
Tabela 5.7 – Análise comparativa dos perímetros de protecção obtidos através de diferentes métodos
(Fonte: adaptado EPA, 1897).

Localidade Tempo de transito		Sudeste da Florida 500 dias			Sudoeste de Connectica 5 anos			Cape Cod (Massachusetts) 50 anos		
Método		R.F.C.	M.A.	M.N.	R.F.C.	M.A.	M.N.	R.F.C.	M.A.	M.N.
Parâmetro de comparação		Função do tempo de trânsito	Catálogo de formas simples	Método de diferenças finitas tridimensional de fluxo e transporte	Função do tempo de trânsito	Catálogo de formas simples	Método de diferenças finitas tridimensional de fluxo e transporte	Função do tempo de trânsito	Catálogo de formas simples	Método de diferenças finitas tridimensional de fluxo e transporte
Percentagem de área protegida comum (Ac)		57%	100%	100%	100%	91%	100%	41%	79%	100%
Percentagem de área sem protecção (B)		43%	0%	0%	0%	9%	0%	59%	21%	0%
Percentagem de área protegida sem ser necessária (C)		0%	21%	0%	290%	160%	0%	50%	52%	0%
CA	Tipo	Livre			Livre			Livre		
	Materiais	Calcários e Arenitos			Detríticos: areias e grés não consolidado			Detríticos: areias e grés não consolidado		
	Espessura Saturada	b = 91 m			b = 20 m			B = 38 m		
	Transmissividade	T = 1800 m ² /dia			T = 1100 m ² /dia			T = 570 m ² /dia		
	Permeabilidade	K = 20 m/ dia			K = 55 m/ dia			K = 15 m/ dia		
	Gradiente	Baixo (i = n/c)			Alto (i = 0,005)			Alto (i = 0,003)		
	Proximidade ao limite de fluxo da captação	Não			Sim			Sim		
	Entradas	Infiltração da pluviosidade, rios, canais e lagos			Infiltração da pluviosidade			Infiltração da pluviosidade		
	Saídas	Extracção			Extracção e pequenas descargas no rio			Extracção		

Legenda: R.F.C.: Raio fixo calculado
M. A.: Métodos Analíticos
M.N.: Métodos numéricos
CA: Características do aquífero

Percentagem da área protegida comum (Ac) $Ac = (Ac)/P \times 100\%$
Percentagem da área sem protecção (B) $B=B/P \times 100\%$
Percentagem da área sem protecção (C) $C=(C-Ac)/P \times 100\%$

Neste quadro aparecem esquematizadas as principais características do aquífero, o que permite, numa primeira análise, extrapolar as conclusões obtidas noutros casos semelhantes. Na Figura 5.25 é indicado graficamente o que representam as percentagens assinaladas no quadro anterior, tomando P como a área dada pelo método usado como standard para comparar e C a área dada pelo método que se pretende validar



Fuente: EPA, 1987

Figura 5.25 – Área protegida mediante a aplicação de diferentes métodos.

Os resultados obtidos no sudoeste da Florida (EUA) usando o RFC e um outro método analítico, proporcionam perímetros com certas semelhanças aos obtidos mediante o uso de um modelo numérico. Isto deve-se ao facto de o gradiente hidráulico ser baixo e não existirem barreiras aos limites de fluxo. Ainda assim, deverá destacar-se que no primeiro caso (o uso de RFC) baixa em cerca de 43% a área sem necessidade de protecção, no caso do outro método analítico cobre toda a zona definida no modelo matemático, representando a zona sobreprotegida apenas 21%.

A aplicação no sudoeste da Connectica do RFC e outro método analítico protege praticamente toda a área necessária, no entanto incluem nos perímetros amplas zonas que não seria necessário incorporar. Esta sobreposição é da ordem do 160% quando se usam procedimentos analíticos que podem chegar aos 260% no caso de se utilizar o RFC. Estes métodos não devem ser aplicados nestes casos, devido ao facto de existirem barreiras ao fluxo e um gradiente regional importante.

No Cape Cod, Massachusett, a utilização do RFC dá um resultado muito pouco preciso ao cobrir uma área muito menor que a necessária e incluir muitas zonas que não seriam necessárias. Em relação ao emprego de métodos analíticos deve referir-se que a utilização de formas variáveis simplificadas baixa consideravelmente a superfície sem protecção, principalmente na zona saturada da captação e se sobre

protegerem amplas zonas não saturadas no sentido do fluxo. Os resultados são mais exactos como o método de Horsley, se bem que a sobreposição ainda é elevada. Neste caso, as divergências devem-se também à existência de barreiras ao fluxo e a um gradiente regional considerável.

Na Figura 5.26 são indicados os perímetros calculados pelos métodos já citados nas respectivas cidades mas para distintos tempos de trânsito.

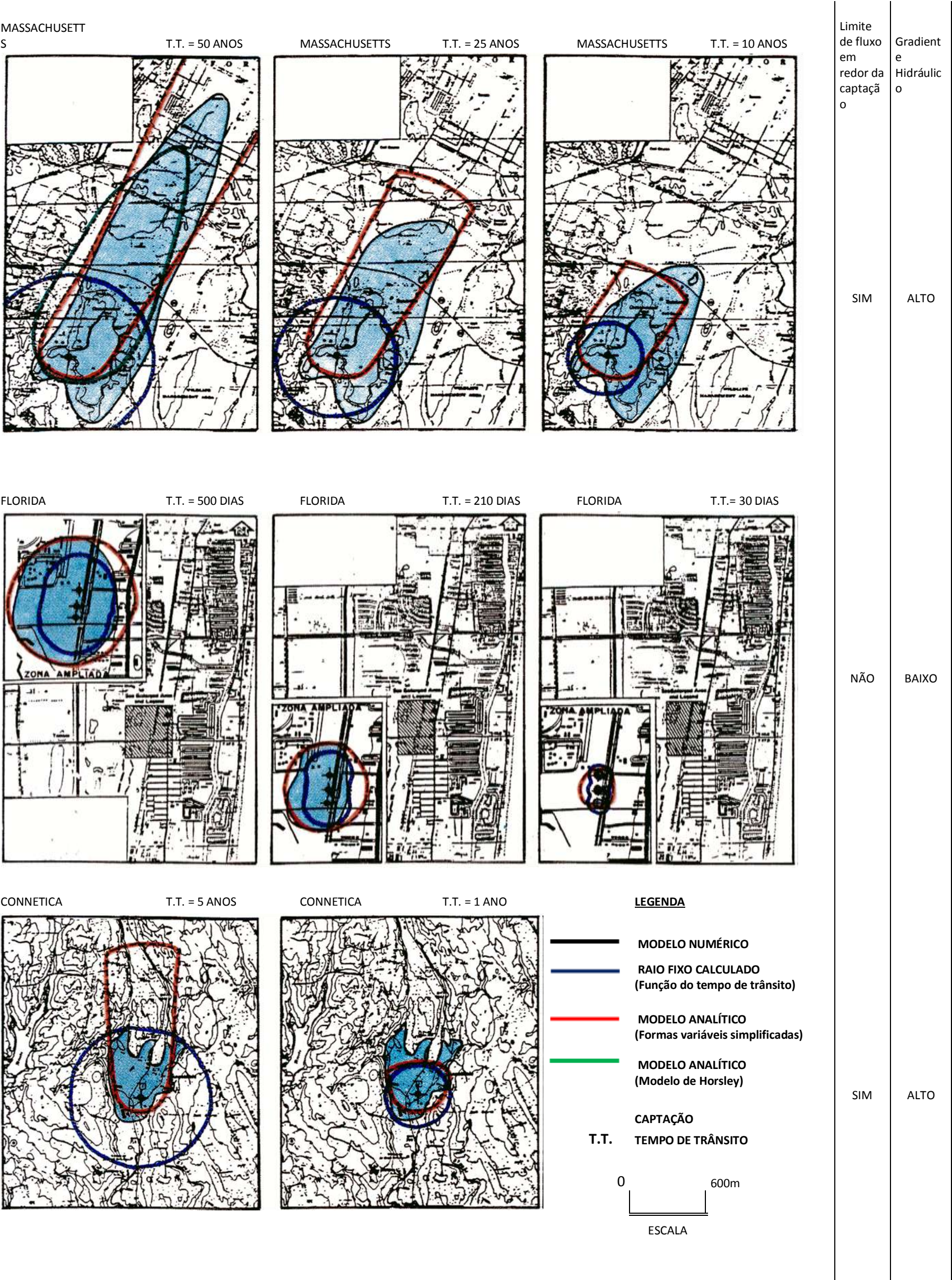


Figura 5.26 – Análise comparativa dos diferentes métodos para distintos tempos de trânsito em várias cidades (Fonte: Adaptado de EPA, 1987).

Podemos observar claramente como as diferenças se agudizam ao serem considerados tempos superiores.

A conclusão geral que se pode obter destes exemplos é a necessidade de se realizar um estudo hidrogeológico prévio que possa indicar quais os métodos compatíveis com as condições hidrogeológicas. Assim a existência de barreiras que limitem o fluxo às captações e/ou elevados gradientes hidráulicos podem obrigar a rejeitar de antemão métodos que não tem esses aspectos em consideração, ao diminuírem enormemente a sua exactidão, como se pode observar nos exemplos anteriores.

Na Tabela 5.8 são apresentados os dados necessários para a aplicação de cada método, desde o raio fixo arbitrário, em que não é necessário qualquer dado, até ao exemplo de modelos matemáticos muito elaborados que requerem uma grande variedade de dados, passando por praticamente todas as situações intermédias.

Tabela 5.8 – Dados necessários para poder aplicar os diferentes métodos existentes para a determinação dos perímetros de protecção. Síntese das metodologias de delimitação de perímetros de protecção (Adaptado de Moinante, 2003).

Método		K	b	T	S	me	i	Q	I	H	d	t	h	D.I.	D.t.	Dir. e sent. de fluxo	Limites hidrogeol.	Geomet. do aquífero	L.ns	L.s	Análises	Referência
Raio fixo arbitrariamente																						5.2.1.1
Lei Darcy	Em função do tempo propagação	x				x	x				x											5.2.2.1
	Em função do rebaixamento	x				x	x					x										5.2.2.1
Raio fixo	Função do tempo de propagação					x		x		x												5.2.2.2
	Função do rebaixamento			x	x			x														5.2.2.2
Fluxo entre Aquíferos			x			x		x				x										5.2.2.3
Fluxo Uniforme		x	x				x	x														5.2.2.4
Equação Equilíbrio Thiem		x	x					x			x											5.2.2.5
Hoffman e Lillich		x	x	x	x	x	x	x			x	x										5.2.2.6
Wyssling		x	x			x	x	x								x						5.2.2.7
Formas Variáveis Simplificadas (1)		x	x		x	x	x	x								x						5.2.2.8
Krijgsman e Lobo Ferreira		x	x			x	x	x				x										5.2.2.9

Continua...

...Continuação

Método		K	b	T	S	me	i	Q	I	H	d	t	h	D.I.	D.t.	Dir. e sent. de fluxo	Limites hidrogeol.	Geomet. do aquífero	L.ns	L.s	Análises	Referência
Albinet				x	x			x					x									5.2.3.1
Tempo de transito por ábacos	Sauty e Tyerri	x	x			x	x	x									x					5.2.3.3/4
	Jacobs e Bear		x	x		x	x	x								x						5.2.3.2
Nomogramas de V.W. e V.D.			x			x		x	x													5.2.3.5
Modelos de fluxo e transporte		x	x	x	x	x		x	x			x	x	x	x	x	x	x				5.2.4.3
Horsley			x					x	x	x	x	x	x			x	x					5.2.5.1
Hidrogeológicos													x			x	x	x				5.2.5.2
Traçadores																					x	5.2.5.2-1
Tritio																					x	5.2.5.2-2

(1) Apenas na fase de construção do catálogo

Legenda do quadro 5.8

Parâmetros	Símbolo	Dimensões
Permeabilidade	K	L/T
Espessura saturada do aquífero	b	L/T
Transmissividade	T	L ² /T
Coeficiente de armazenamento	S	A dimensional
Porosidade eficaz	me	A dimensional
Gradiente hidráulico	i	A dimensional
Caudal	Q	L ³ /T
Infiltração	I	L/T
Espessura saturada na captação	H	L
Rebaixamento	d	L
Tempo de extracção	t	T
Piezometria antes da extracção	h	L
Dispersividade longitudinal	D.l.	L
Dispersividade transversal	D.t.	L
Longitude da zona não saturada	L.ns	L
Longitude da zona saturada	L.s	L

O perímetro de protecção proposto em relação à aplicação do método escolhido deve ser defensável. Que permite proteger áreas com limites claramente definidos, com bases sólidas e assentes em argumentos científicos. Que dificultará acções legais contrapostas pelos afectados. A este respeito os métodos tecnicamente mais complexos, como os modelos matemáticos, envolvem um elevado custo de execução. No entanto, os resultados obtidos são mais fiáveis e por isso será mais difícil de suscitar recursos em relação aos de mais baixo custo, mas de menor rigor científico como, por exemplo, no do raio fixo. Estes poderiam obrigar a expropriações de locais onde não seria necessário efectua-las. Ou resultarem em perímetros sobredimensionados que, embora garantissem a protecção requerida, incrementariam notavelmente os custos da sua aplicação como se verá.

5.3.2 - CONSIDERAÇÕES ECONÓMICAS

5.3.2.1 - CUSTO DA APLICAÇÃO DOS DIFERENTES MÉTODOS

O aspecto económico na escolha do método a utilizar é um factor muito importante, principalmente quando se trata de realizar um planeamento regional. A melhor forma de actuar nesta planificação poderá passar por calcular perímetros de protecção mediante a aplicação de métodos simples e económicos. Os resultados servirão de base para a aplicação ulterior de outros métodos, mais exactos, mas que implicam um investimento económico maior.

De um modo geral é muito difícil quantificar o custo envolvido, uma vez que os trabalhos necessários para a sua utilização podem ser muito diferentes nos distintos aspectos práticos, mesmo quando o método seleccionado é o mesmo. Isto deve-se ao facto do conhecimento dos parâmetros hidrogeológicos ser muito díspar nas diferentes regiões.

A Tabela 5.9 mostra uma estimativa do custo previsto na aplicação de cada um dos métodos.

Tabela 5.9 – Custo da determinação do perímetro de protecção segundo os diferentes métodos.

Métodos	Tempo requerido para cada captação (dias)	Nível de experiência (*)	Custo aproximado por captação (€)	Risco de potencial derrapagem de custos
Raio fixo arbitrariamente	1 a 5	1	2.000 a 10.100	Baixo
Raio fixo calculado	1 a 10	2	2.600 a 26.500	Baixo
Métodos analíticos	2 a 20	3	6.400 a 64.000	Médio/Alto
Métodos hidrogeológicos	4 a 40	3	12.800 a 128.600	Médio/Alto
Métodos matemáticos de fluxo e transporte	10 a 200	4	44.800 a 899.000	Alto
Poder auto depurador do terreno	1 a 10	2	2.600 a 26.500	Baixo/Médio
Emprego de traçadores	2 a 20	3	6.400 a 64.000	Baixo/Médio
Datação com trítio	2 a 20	3	6.400 a 64.000	Baixo

(*) Projectos por contrato (ITEG 1990)

1. Técnico superior com menos de quatro anos de experiência (1.800€/dias)
2. Técnicos superior com experiência entre quatro e sete anos (2.600€/dias)
3. Técnico superior com experiência entre sete e dez anos (3.200€/dias)

4. Técnico superior especialista (4.500€/dias)

Nota: Estes custos incluem os custos gerais de estrutura de um gabinete de projectos.

Supondo-se um período de trabalho de 8 horas e 20 dias por mês e 11 meses por ano.

O intervalo existente no número de horas, e portanto o custo, deve-se à experiência dos técnicos encarregues da sua realização e/ou da disponibilidade de dados. De qualquer modo, na elaboração deste quadro, partiu-se do pressuposto de que é fácil a obtenção dos parâmetros hidrológicos requeridos. Ou seja, a quantidade calculada corresponde essencialmente ao custo dos trabalhos de gabinete na utilização dos métodos, uma vez que se dispõem dos dados técnicos necessários ou se a sua obtenção não supõem um investimento elevado.

Por sua vez, a coluna do risco potencial de derrapagem de custo, que se inclui na Tabela 5.19, refere-se principalmente à obtenção dos dados e dos estudos prévios, que podem fazer com que o custo real da delimitação do perímetro de protecção se venha a multiplicar. Na Tabela 5.10 é exposto de modo meramente ordenativo, alguns factores que podem supor uma derrapagem de custos apreciável. Por exemplo, na obtenção da transmissibilidade e/ou do coeficiente de armazenamento pode ser necessária a realização de um ensaio de bombagem o que implica um gasto adicional de 1000 a 1200€. Mesmo, o levantamento de pontos de água e a realização de uma campanha de controlo piezométrico, para determinar o gradiente hidráulico e outros trabalhos admite-se um aumento considerável no custo previsto para os trabalhos a realizar.

Nos perímetros de protecção de captações de abastecimento urbano realizadas pelo ITGE e a Confederação Hidrogeológica do Júcai, nos anos 90, o investimento da população para proteger as suas captações oscilou, entre 3500 a 7000€, em função do número e das peculiaridades. A aplicação do método, se existirem os dados necessários, representa apenas 20% a 30% do investimento total. A maior parte dos gastos corresponde ao que na Tabela 5.9 se chamou risco de potencial derrapagem. Em nenhuma destas populações se utilizou modelos matemáticos, resolvendo-se por exemplo mediante o emprego de diferentes métodos analíticos.

Tabela 5.10 – Potenciais derrapagens nos custos na determinação do perímetro de protecção.

CONCEPÇÃO		Custo Unitário (*)	Total Estimado (€)
Análise da situação de abastecimento			29.000 a 87.300
Estudos hidrogeológicos			58.200 a 291.000
Inventário de pontos de água		4.300	43.600
Inventário de potenciais focos de contaminação			58.200 a 116.400
Estudos de vulnerabilidade			29.000 a 116.400
Ensaio de bombagem (controlo e interpretação)		116.400	116.400
Tomada de amostras		3.100	30.800
Análises químicas normais		4.300	21.800
Análises químicas completas		12.800	64.000
Análises microbiológicas		4.500	45.400
Análises isotópicas	Tritio	14.500	14.500
	O ¹⁸ , deutério	8.700	8.700
Traçadores			(**)
Estudos socioeconómicos sobre o impacto da aplicação do perímetro			58.200 a 116.400
Mecanografia e delimitação			116.400

(*) Preço aplicável aos projectos do ITGE em 1991

(**) Preço muito variável dependendo das características hidrogeológicas locais

5.3.2.2 - IMPACTO SOCIOECONÓMICO NA APLICAÇÃO DO PERÍMETRO DE PROTECÇÃO

Uma vez dimensionado o perímetro de protecção, fixados os seus limites e a sua distribuição por zonas, estabelecidas as restrições de actividades sobre a superfície destas zonas e definido o sistema de vigilância e alerta que assegura o seu bom funcionamento, como sistema de vigilância contra a contaminação, é necessária a sua implementação no terreno. Esta implementação trará consigo um custo que pode dividir-se em duas secções:

1 – Custo Técnico Objectivo

Deriva da aplicação do perímetro. É independente das características socioeconómicas do lugar onde se vai implantar. Consiste basicamente nas obras de instalação na captação, vedação da zona imediata de protecções absolutas, instalação do sistema automatizado de controlo, entre outros.

2 – Custo variável

Produto das possíveis restrições impostas à actividade socioeconómica sobre cada uma das áreas do perímetro. Derivam em custos extraordinariamente variáveis nos quais se englobam:

- Modificação do uso do solo;
- Expropriações, indemnizações;
- Modificação de obras de construção civil;
- Modificação/transferência de actividades potencialmente contaminantes (industriais, agrícolas, pecuárias, etc.).

Nalgumas ocasiões é recomendável incluir nestes gastos a realização de campanhas de informação que expliquem a necessidade da sua aplicação e os benefícios que trazem à comunidade.

Para calcular estes custos é imprescindível estudar a qualificação dos terrenos que serão afectados pelo perímetro. Analisar se será necessário indemnizar os proprietários pelas limitações e condicionantes ao uso do território, que o perímetro determina, e avaliar o custo das indemnizações.

Na figura seguinte é apresentado um esquema onde é efectuada uma análise dos modelos a utilizar de acordo com considerações do tipo de abordagem, variáveis, alvo, questões importantes e domínio, bem como os dados obrigatórios que são necessários para a sua utilização.

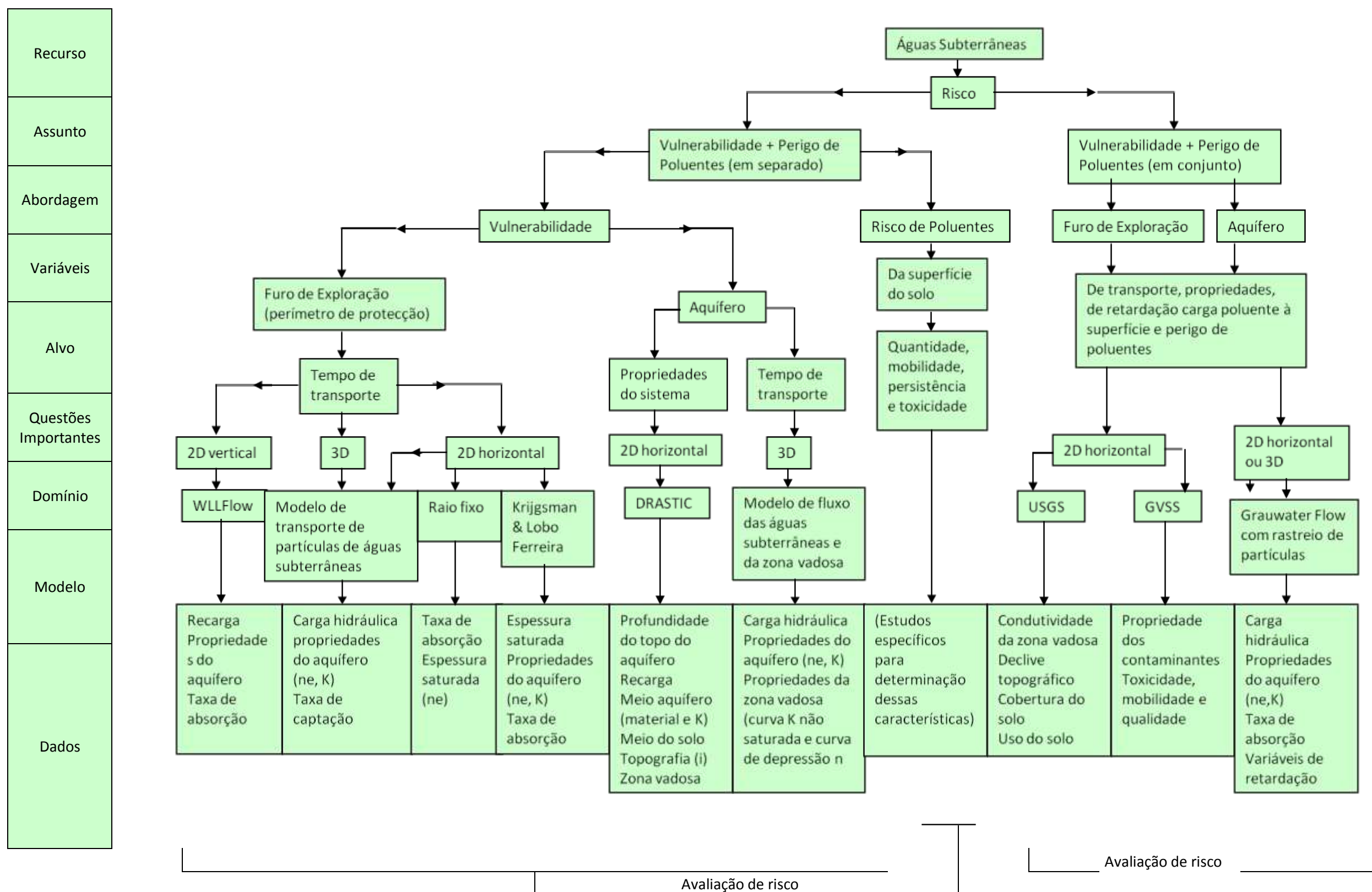


Figura 5.27 – Organigrama para selecção de métodos e modelos para a protecção de recursos hídricos subterrâneos (Fonte: adaptado de Lobo-Ferreira *et al.*, 2005)

CAPÍTULO - 6

CASO DE ESTUDO

6.1- CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA E AMBIENTAL

O presente caso de estudo localiza-se na Península de Setúbal (Figura 6.1), no distrito de Setúbal, numa depressão geográfica entre os concelhos de Almada e Seixal. Como exemplo de aplicação e análise crítica das metodologias sugeridas na bibliografia, para delimitar perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas, foi seleccionada para o efeito numa captação de abastecimento público do concelho de Almada, designada ao longo deste trabalho por FR1.

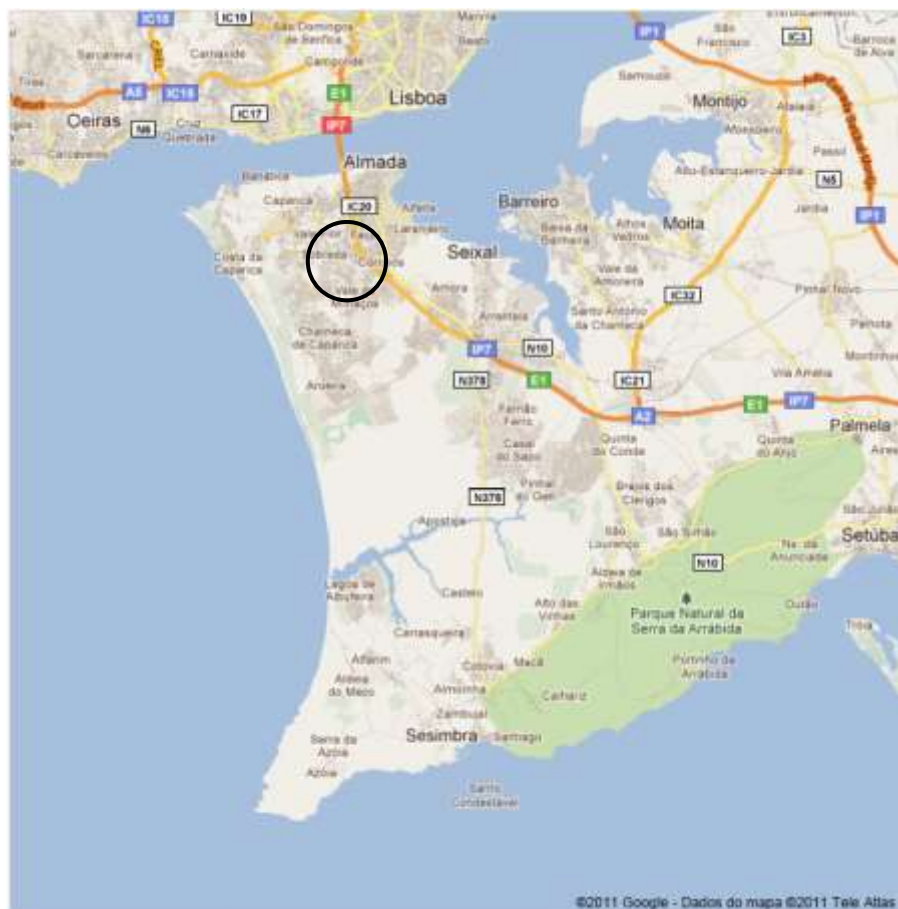


Figura 6.1 – Mapa da Península de Setúbal, Escala 1:20000, com a localização da captação seleccionada para o estudo.

Esta captação foi escolhida por se encontrar a captar no aquífero confinado do miopliocénico e em virtude da sua espessura saturada (de 52m), se encontrar entre os valores de espessura média do Pliocénico (entre 50 e 100m), para os quais já existem alguns estudos e parâmetros calculados para estes valores.

Os Serviços Municipalizados de Água e saneamento de Almada (SMAS), dispõe de 33 captações para abastecimento da população residente, estimada em 173.298 habitantes, de acordo com os resultados provisórios dos censos 2011. A captação escolhida (FR1), foi concluída a sua execução em 7 de Fevereiro de 1970, para substituição da captação existente no mesmo local. A perfuração foi iniciada com 470mm de diâmetro, atingindo a profundidade de 116,14m com o diâmetro de 15", sendo efectuada pelo método "rotary" com registo eléctrico. Esta captação encontra-se localizada na freguesia da Sobreira de Caparica (Figura 6.3), junto à margem da vala de drenagem de águas pluviais da Sobreira, numa zona classificada de Reserva Ecológica Nacional e área de Domínio Hídrico Nacional por se encontrar numa zona de cheia ou inundável, a menos de 10 m da margem da linha de água.

O ensaio final da captação FR1 da Sobreira foi efectuada a 20l/s, através de grupo electrobomba submersível. Sendo a captação do tipo furo vertical e a natureza da formação aquífera atravessada, areias.

As características organolépticas e físicas registadas foram: Cor – incolor; Cheiro – inodoro; Turvação – límpida; Condutividade a 25°C – 342,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$; PH – 5,6.

As características químicas registadas foram: Cálcio, Ca – 0,82 mval/l (16,3 mg/l); Magnésio, Mg – 0,46 mval/l (5,6 mg/l); Ferro, Fe – 0,01 mval/l (0,5 mg/l); Bicarbonatos, CO_3H – 0,60 mval/l (36,6 mg/l); Sulfatos SO_4 – 0,33 mval/l (16,0 mg/l); Cloretos, Cl – 1,80 mval/l (63,9 mg/l); CO_2 livre – 54,0 mg/l; O_2 consumido do Mn O_4K , em meio ácido, 10 min. de ebulição – 1,4 mg/l; Dureza total – 1,28 mval/l (6,4 °Fr.); Alcalinidade (H) – 0,60 mval/l (3,0 °Fr.).

Sendo a apreciação final da água captada como medianamente mineralizada, agressiva. Com a nota de que o teor em ferro obtido na amostra enviada, foi medido após filtração.

Durante a perfuração foram atravessadas as camadas indicadas (Figura 6.2), no qual se esquematiza a composição da coluna definitiva que foi empregada, assim como a posição dos tubos-ralos, os quais foram localizados de acordo com a observação das amostras recolhidas quando da execução da perfuração e a interpretação do registo eléctrico efectuado no furo.

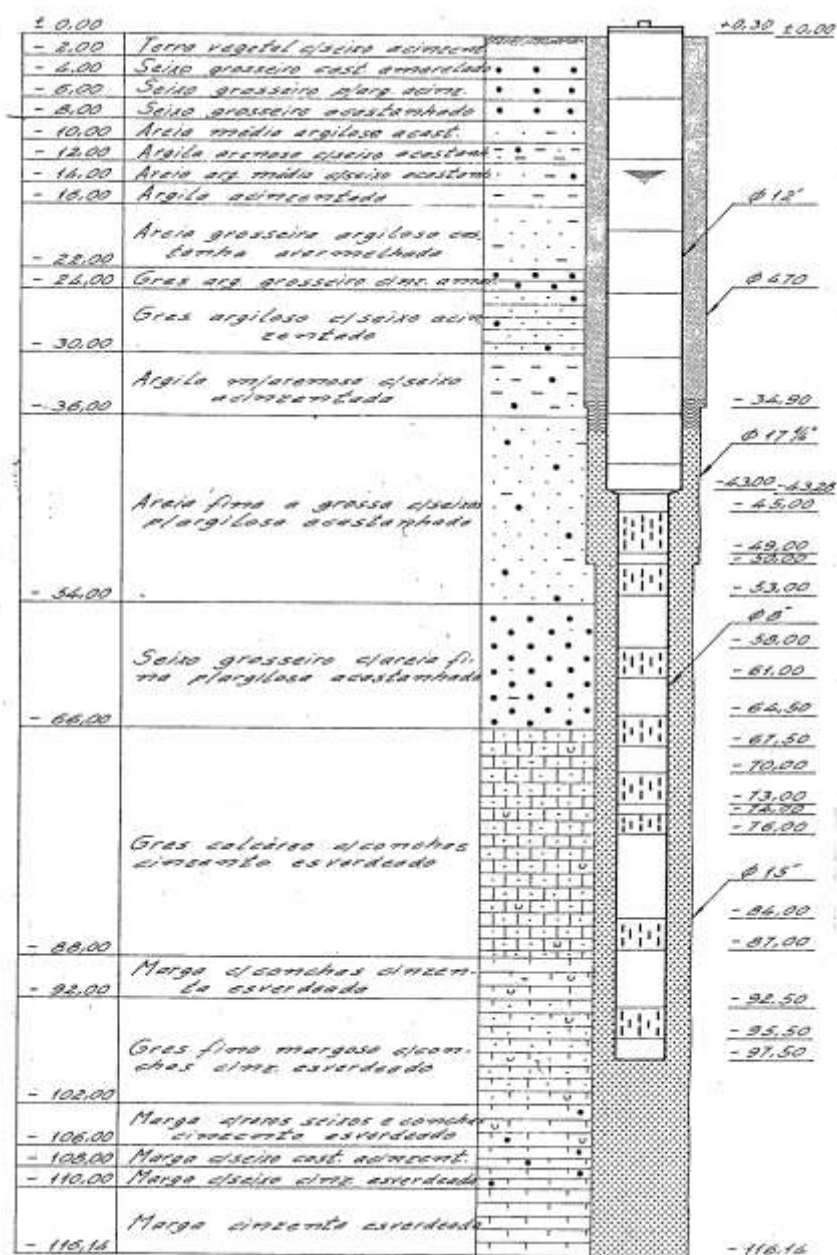


Figura 6.2 – Perfil da captação FR1 (Fonte: SMAS Almada)

Para determinação das condições de exploração da captação e após os necessários ensaios de limpeza e desenvolvimento com compressor, foi efectuado o ensaio final de caudal com bomba eléctrica submersível.

O resultado deste ensaio pode resumir-se ao seguinte:

Nível hidrostático..... – 12,80m

Nível hidrodinâmico para o caudal de 20 l/s..... – 22.50m

Estes níveis foram medidos em relação ao terreno e o ensaio realizado entre 28/1 e 5/2/1970.

Através dos ensaios realizados nessa data, foi considerado adequado para o caudal de exploração da captação, um caudal máximo da ordem dos 70 m³/hora para a extracção, do qual o pé da bomba a instalar poderá ficar instalado a 40m abaixo do terreno.

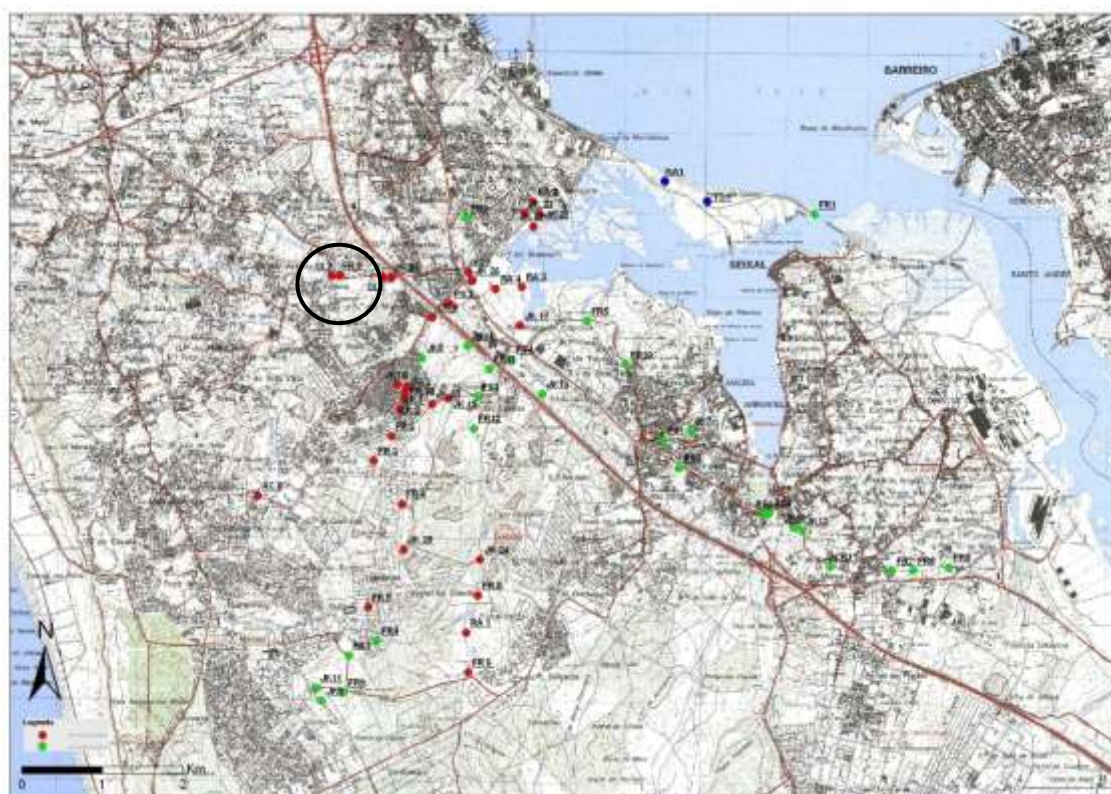


Figura 6.3 – Planta de localização dos furos de captação dos concelhos de Almada e Seixal, com destaque para a localização da captação seleccionada para o estudo (FR1). (Fonte: www.smasalmada.pt.)

A captação em estudo, é das únicas que se localiza dentro dos limites do concelho de Almada, pois a freguesia de Corroios é a zona onde se encontra o maior número de captações de água que abastecem o concelho de Almada e Seixal. A zona em estudo faz fronteira a Norte com a freguesia da Feijó a Oeste com a freguesia da Sobreda de Caparica, a Sul com Vale Milhaços e a Este com o prolongamento do esteiro do rio Tejo a zona do Mar da Palha, no sapal de Corroios (Figura 6.4).

A captação está localizada numa área com grande interesse geoambiental envolvendo a Reserva Natural do estuário do Tejo, a Área de Paisagem Protegida da arriba Fóssil e as zonas húmidas com sensíveis habita danares e aluviais.

O estuário do Tejo está incluído no conjunto das dez zonas húmidas mais importantes da Europa, o que se deve essencialmente à sua importância económica e ecológica, nomeadamente no que respeita ao seu valor como habitat de aves aquáticas, cujo património é extraordinário, para além do seu papel primordial na manutenção dos stocks costeiros de pescado. Assim, a nível internacional, encontra-se integrado na rede de áreas abrangidas pela Directiva Aves (Zona de Protecção Especial).

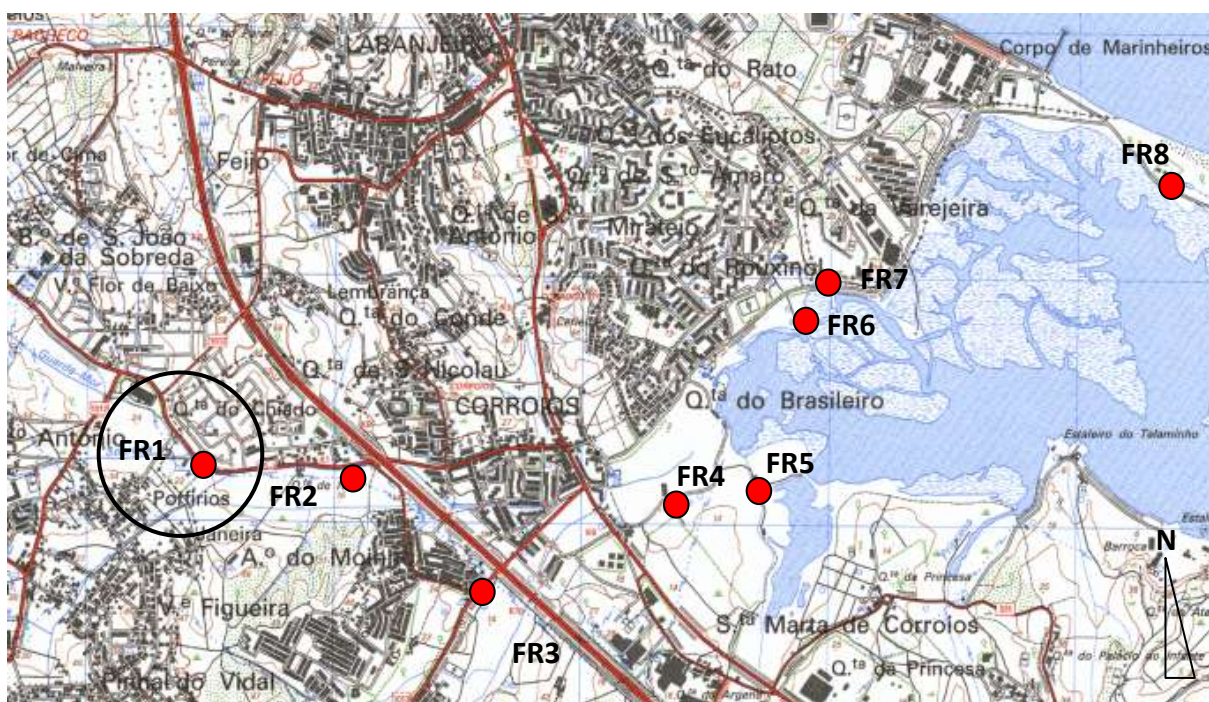


Figura 6.4 – Planta de localização da captação em estudo (Fonte: www.smasalmada.pt).

Segundo observação da Figura 6.5, encontra-se em área de influência de zona sensível ao abrigo do decreto-lei n.º 198/2008, de 8 de Outubro (INAG).

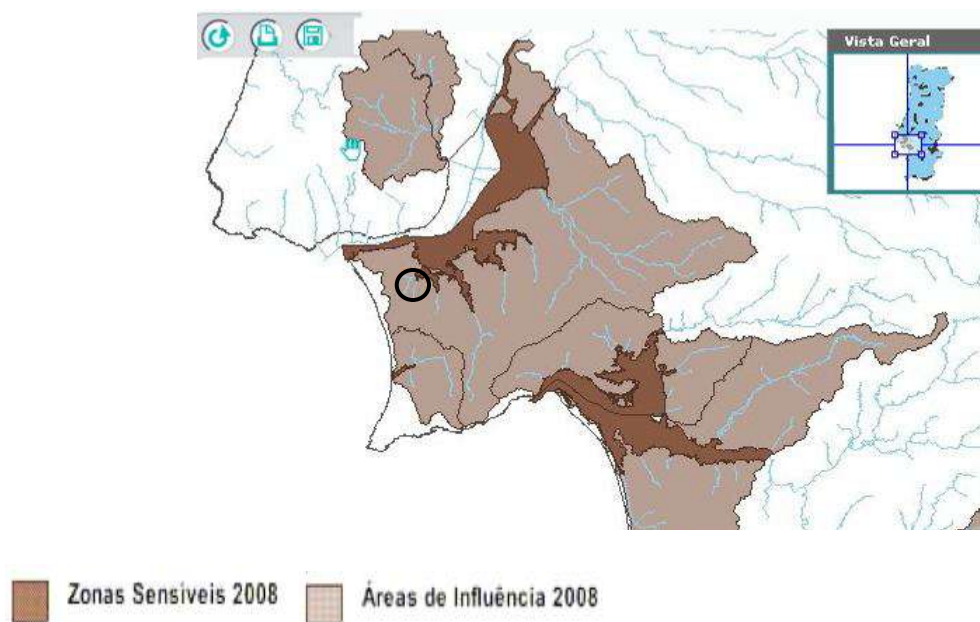


Figura 6.5 - Classificação de “zonas sensíveis” e “áreas de influência” segundo INAG (Fonte: <http://intersigweb.inag.pt/InterSIG/>).

No que concerne a áreas protegidas, zonas de protecção especial e sítios (Rede Natura 2000), o município de Almada, em conformidade com o decreto-lei n.º 168/84, de 22 de Maio, inclui a Área de Paisagem Protegida da Arriba Fóssil da Costa da Caparica (Figura 6.6) com a Reserva Botânica da Mata Nacional dos Medos (ou Pinhal do Rei) classificada como Reserva Botânica através do decreto-lei n.º 444/71, de 23 de Outubro, sendo uma importante zona de recarga do sistema de aquíferos como se pretende demonstrar ao longo deste trabalho.

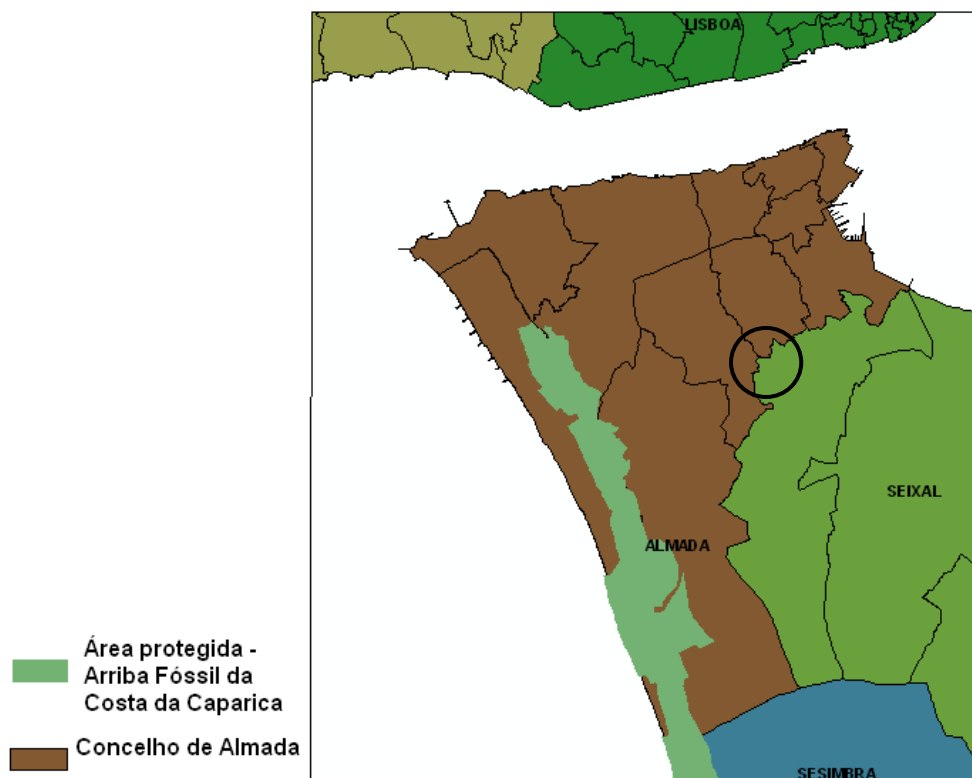


Figura 6.6 - Áreas Classificadas como Área de Paisagem Protegida no Concelho de Almada
(Fonte: adaptado de Atlas de Ambiente).

As formas do relevo da zona de estudo são condicionadas, em grande medida, pelo substrato geológico que lhes está subjacente. Na área dos Concelhos em causa distinguem-se fundamentalmente uma superfície de aplanação interior, com cotas regularmente elevadas, a qual se encontra limitada, a norte e a oeste, por arribas com declives bastante acentuados (Figura 6.7).

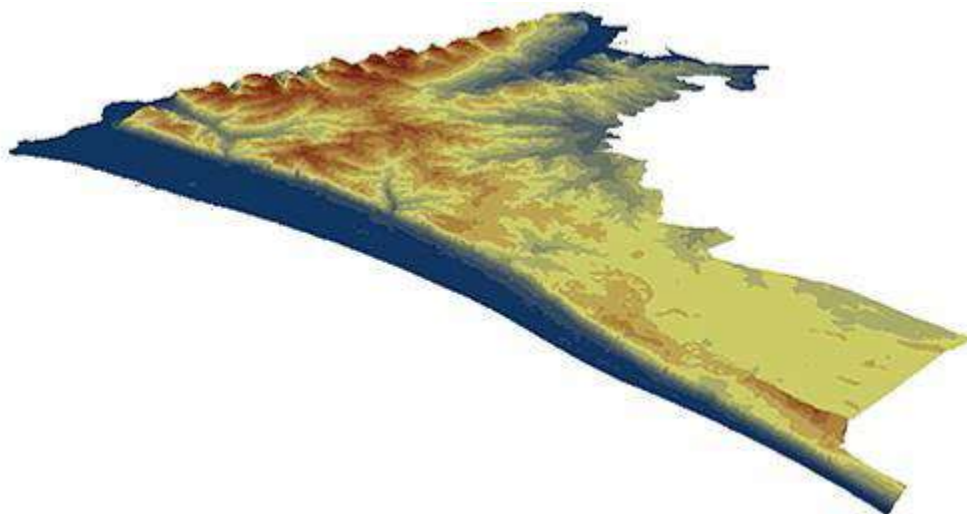


Figura 6.7 – Modelo digital do terreno do concelho de Almada (adaptado de Atlas do Ambiente).

A área interior dos concelhos de Almada e Seixal, formada essencialmente por materiais detríticos plio-pleistocénicos, constitui uma vasta superfície de aplanção em que as cotas variam, na maioria, entre os 60 e os 80 m. Toda esta área apresenta suaves ondulações recortadas por alguns vales amplos de interflúvios arredondados, sendo que as depressões mais importantes se localizam a sudeste, junto à fronteira do Concelho de Almada com o Concelho do Seixal, onde tem início um conjunto de esteiros da Vala de Corroios, a qual vai desaguar mais a oriente, no Sapal de Corroios.

A região onde se localiza a captação de água subterrânea do presente caso de estudo é marcada profundamente pelo facto de ser uma península onde a água predomina na sua envolvente. A poente temos o oceano atlântico a norte o rio Tejo e a nascente o Mar da Palha e o Sapal de Corroios. Este arranjo geral em forma de bacia com foz no mar da palha, insere-se, na sua totalidade, na parte terminal da Bacia do Baixo Tejo. Esta última consiste numa vasta zona deprimida que, ao longo do tempo, foi percorrida por grandes rios, conservando-se parcialmente emersa, completamente submersa quando invadida pelo mar. Desta dinâmica resultou a acumulação de sedimentos marinhos e fluviais, que actualmente constituem o substrato geológico da região em estudo.

De acordo com Almeida *et al* (2000), na área do Baixo Tejo definiram-se três sistemas aquíferos constituídos por formações detríticas do Terciário e Quaternário. Os aquíferos são porosos, e na margem direita do rio Tejo, que devido à natureza litológica dos sedimentos são do tipo porosocársico.

De uma forma geral, pode verificar-se que durante o Miocénico, a região em estudo encontrou-se sujeita a sucessivos avanços e recuos do nível do mar, do que originou a deposição de uma espessa série de sedimentos na fronteira entre ambientes marinhos e continentais (ainda que com forte predominância dos primeiros). Por outro lado, no Pliocénico, Plistocénico e Holocénico, a região manteve-se maioritariamente emersa, tendo prevalecido, desta forma, a deposição de sedimentos fluviais e eólicos, os quais cobriram grande parte da Península de Setúbal. Os depósitos sedimentares referidos estão deformados segundo uma dobra de grande amplitude, designada por Sinclinal de Albufeira, que se estende de Lisboa à Serra da Arrábida.

Na região de Almada os depósitos miocénicos encontram-se maioritariamente a Norte do Concelho predominando a este os substratos geológicos do plio-plistocénico.

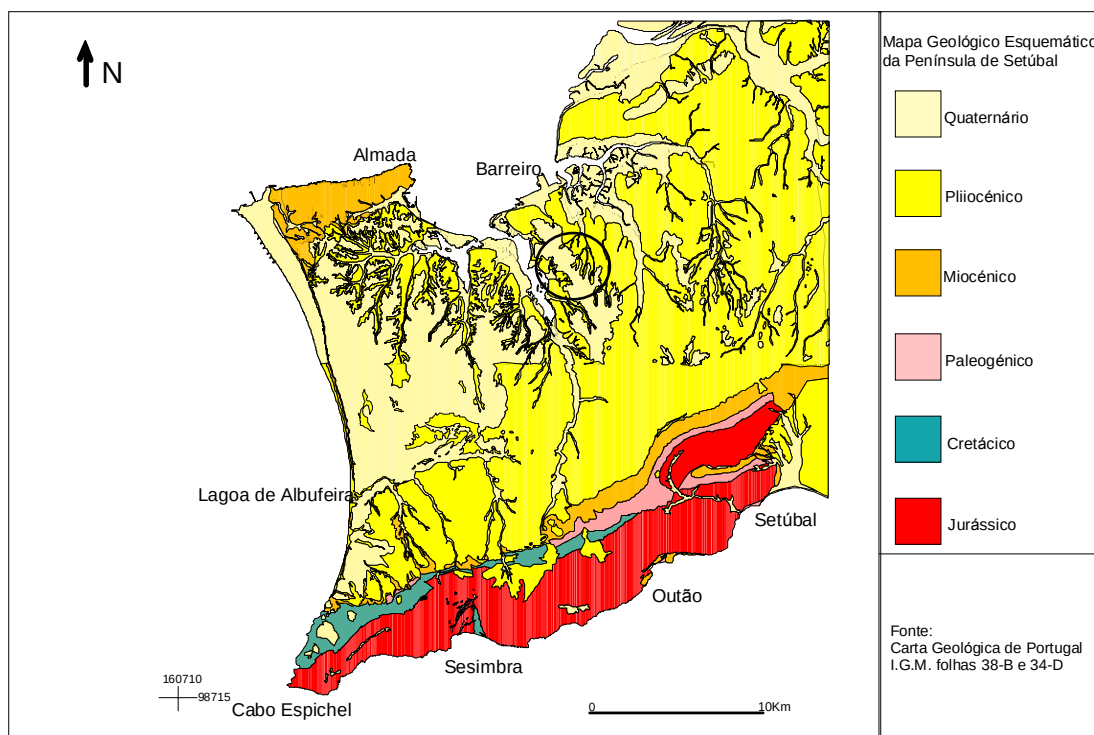


Figura 6.8 – Mapa Geológico esquemático da Península de Setúbal (Fonte: IGM).

O Conglomerado de Belverde é constituído por múltiplos níveis de seixos rolados de quartzo e quartzito e matriz arenosa, separados por níveis arenosos semelhantes ao material subjacente. Constitui, de facto, um conglomerado de matriz arenosa, de cores

amareladas, alaranjadas e avermelhadas, onde os balastros têm diâmetros da ordem dos centímetros.

Nesta região, os siltes e argilas são bastante frequentes, constituindo nomeadamente grande parte da Arriba Fóssil da Costa de Caparica e das arribas da frente ribeirinha.

Do ponto de vista estrutural, a captação estudada está limitada: a) a Norte pelo sinclinal de Albufeira; b) a Este pela falha de Setúbal - Pinhal Novo (FSPN) com orientação aproximada NNW-SSE; c) a Sul pela Falha da Arrábida (FA) situada no mar, que se presume subparalela à estrutura emersa e, d) a Oeste por falha assinalada por Boillot *et al.* (1978), situada cerca de 5 km ao largo, na plataforma continental, como orientação próxima de NW-SE (Ribeiro *et al.* 1990; Kullberg *et al.* 2000, in Kullberg *et al.* 2006).

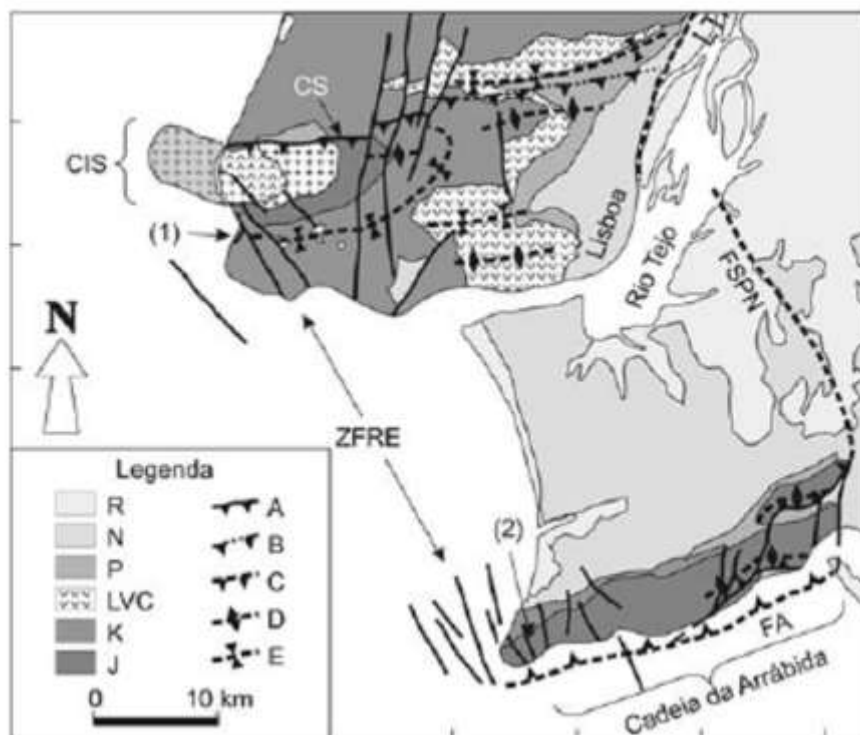


Figura 6.9 - Unidades morfoestruturais na Península Ibérica
(Fonte: adaptado de Ribeiro *et al.* 1979, in Kullberg *et al.* 2006).

A distribuição da sismicidade instrumental em Portugal continental é muito heterogénea e encontra-se essencialmente concentrada a Sul e na margem oceânica adjacente. Esta

avaliação da intensidade sísmica com base na escala internacional ou de Wood-Neumann, permite concluir que a área abrangida pela captação se encontra numa zona de intensidade sísmica máxima de 6, considerado ligeiramente danificante, como pode ser observado na Figura 6.10.

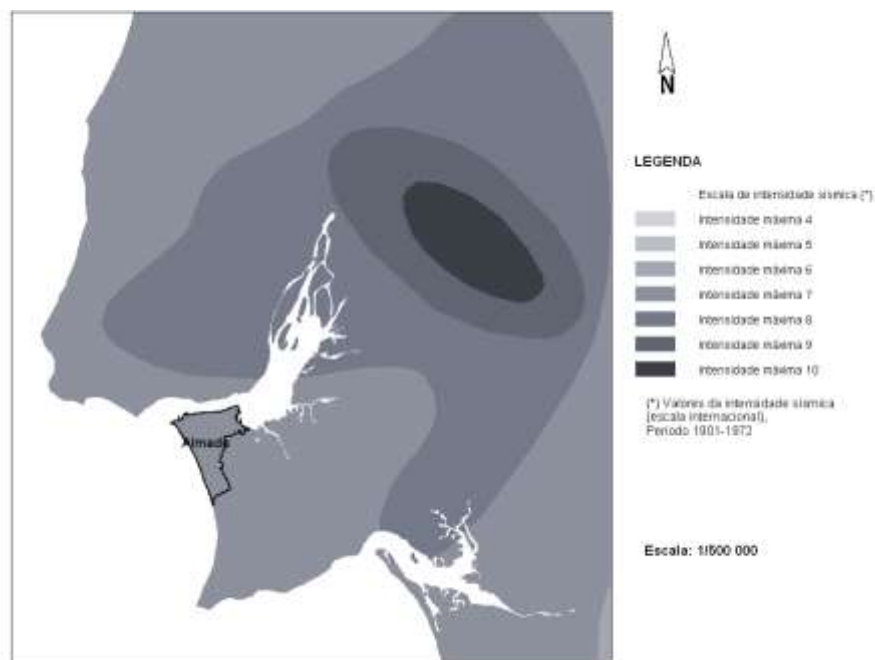


Figura 6.10 – Intensidade sísmica (escala internacional), para o período 1901-1972
(Fonte. adaptado de Atlas do Ambiente).

O escoamento superficial é influenciado pela precipitação atmosférica e por factores relacionados com a geologia (litologia e estrutura) e geomorfologia, como a permeabilidade do solo e subsolo, o tipo de vegetação, a área e morfologia da bacia hidrográfica e a profundidade do nível freático.

Na zona da captação, embora o escoamento superficial não seja muito abundante e se registre uma forte variação ao longo do ano, existem algumas linhas de água na região, principalmente ribeiras e valas individualizadas em pequenas bacias hidrográficas, cujo caudal de escoamento superficial é, em grande parte, alimentado pelas águas subterrâneas. Estas drenam para o estuário (entre Cacilhas e o Seixal) para o canal do Tejo e para o oceano.

A Norte do concelho, os leitos das linhas de água deixam de ter expressão morfológica significativa, visto os declives se irem tornando cada vez mais suaves e o terreno mais aplanado.

São de assinala na zona da captação a Norte, a Vala do Guarda-Mor e Vale Flores, a Vala da Regateira, a Vala da Sobreda, a Sul, a Vala da Charneca e de Vale Rosal.

A maioria destes cursos de água apresenta afluentes e estão associados a zonas aluvionais, como é o caso da Vala da Sobreda.

Em meio urbano, existe forte potencial para a geração de caudais em especial na zona da Vala da Sobreda, devido à impermeabilização do solo e infra-estruturação das águas pluviais.

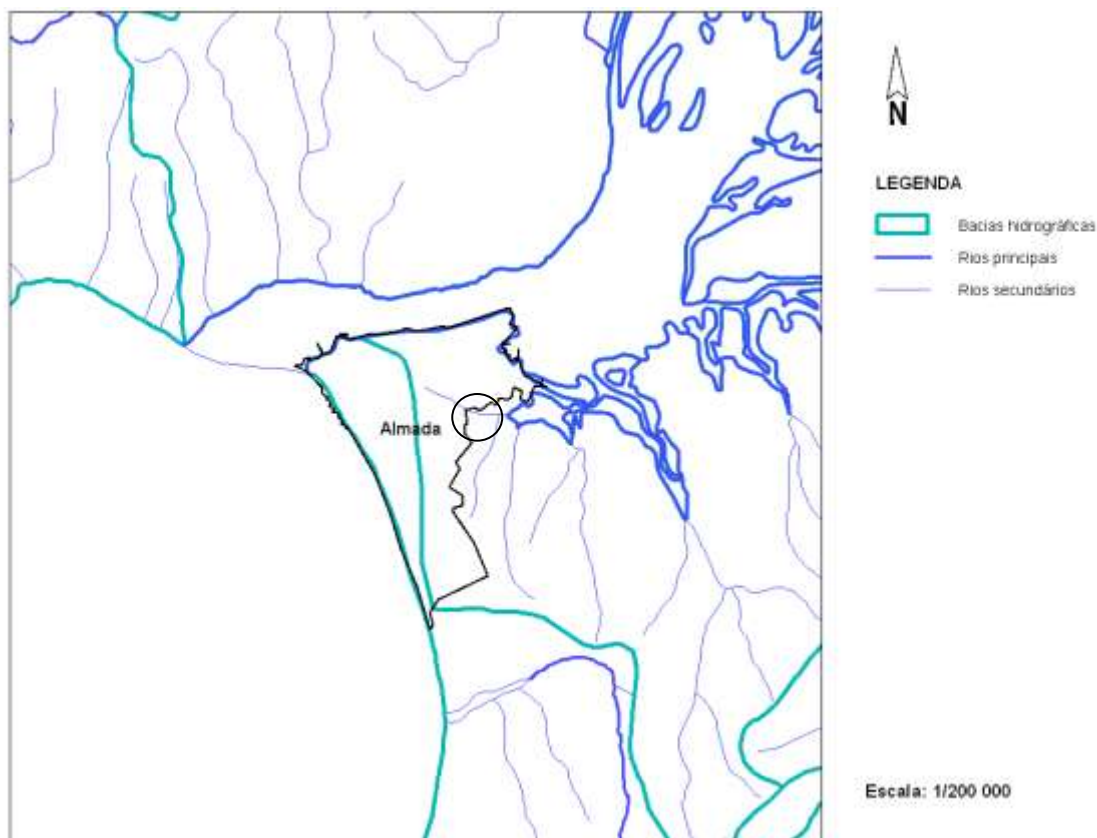


Figura 6.11 – Rede hidrográfica da Península de Setúbal (Fonte: adaptado de Atlas do Ambiente).

Para a tipologia dos solos afectos, à zona do Concelho de Almada, as unidades pedológicas de interesse são as apresentadas na Figura 6.12.

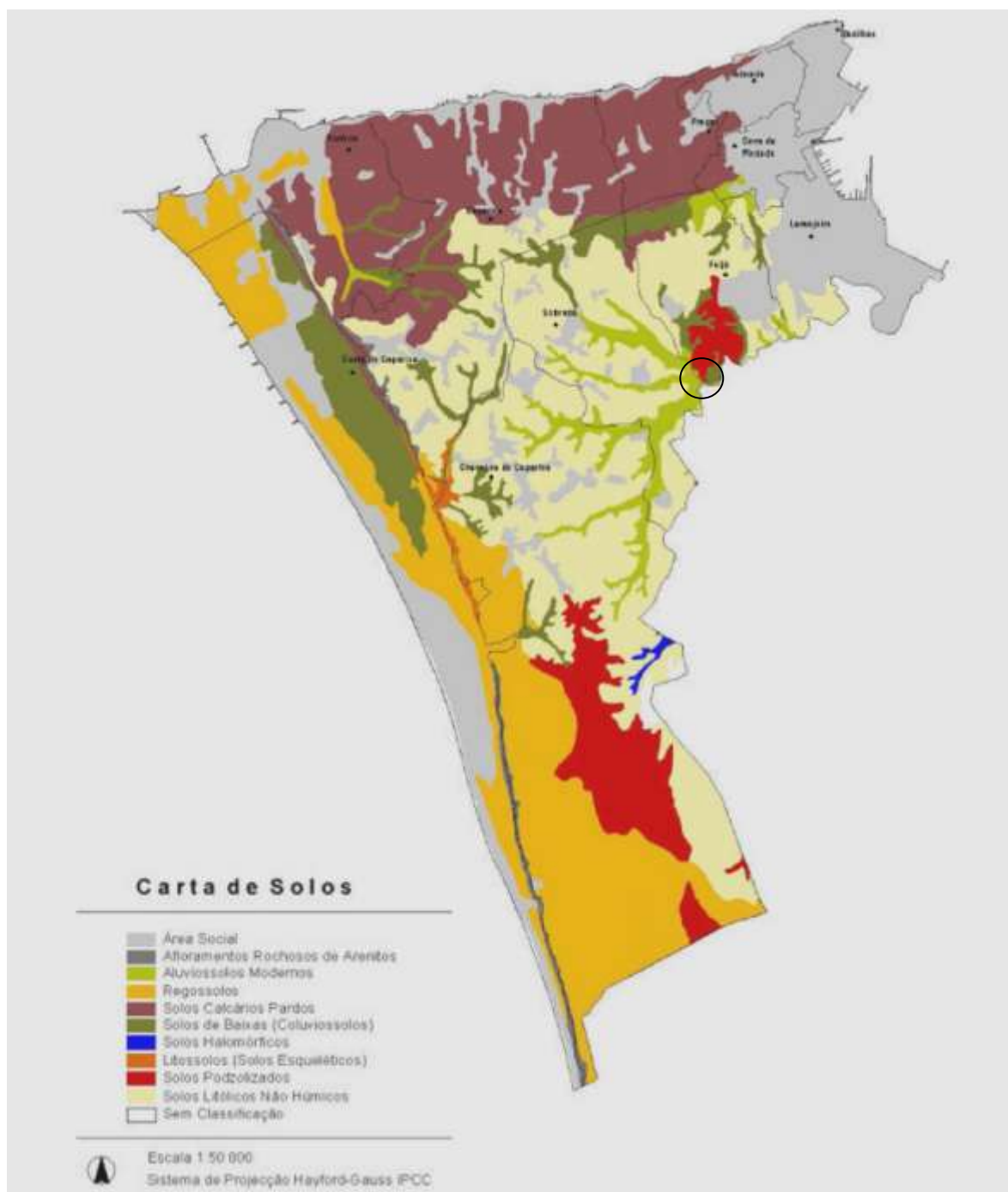


Figura 6.12 - Carta de Solos, escala original 1:50 000, escala aproximada 1:120 000 (Fonte: Projecto Apoio ao Plano Almada Ciclável, Centro de Estudos de Arquitectura Paisagista Prof. Francisco Caldeira Cabral, Fevereiro de 2004).

No concelho de Almada, podem distinguir-se oito tipos principais de solos, quatro dos quais pertencem à classe dos Solos Incipientes, caracterizam-se por serem solos pouco evoluídos, sem horizontes genéticos claramente diferenciados, devido à recente

formação, são eles os Aluviossolos Modernos, existentes nas principais linhas de água do interior do município; os Solos das zonas Baixas (Coluviossolos) também presentes em algumas linhas de água do interior do Concelho e, predominantemente, nas Terras da Costa; os Litossolos de arenitos, limitados a uma pequena faixa da Arriba Fóssil; e os Regossolos psamíticos que integram grande parte da região litoral e meridional do Concelho. Os restantes tipos de solos incluem: os Solos Calcários Pardos, localizados preponderantemente nos cabeços da região setentrional; os Solos Litólicos Não Húmicos que ocorrem numa área significativa do interior; e os Solos Podzolizados e os Solos Halomórficos, ambos com menor representatividade no interior Sul.

Os Aluviossolos Modernos são solos não hidromórficos, constituídos por depósitos estratificados de aluviões e podem receber adições de sedimentos aluvionais. Distinguem-se de acordo com a presença ou ausência de carbonatos. Este tipo de solos desenvolve-se, principalmente, sobre as formações aluvionais resultam da acumulação de materiais provenientes dos horizontes superficiais e/ou de materiais erodidos e arrastados pelas águas fluviais, sendo particularmente abundantes em Vale Figueira, Vala do Guarda-Mor, Regateira e Sobreda. Apresentam, em geral, espessuras consideráveis, bem como, elevados teores de minerais secundários e, muitas vezes, de matéria orgânica, pelo que possuem elevados índices de fertilidade.

Solos de Baixas (Coluviossolos), estão localizados em vales, depressões ou na base das encostas e tal como os anteriores distinguem-se de acordo com a presença ou ausência de carbonatos. Estes solos têm uma origem semelhante à dos Aluviossolos, embora, neste caso, os materiais constituintes apenas tenham sido arrastados ao longo das encostas e não pelas águas fluviais.

São considerados solos de elevado valor ecológico os Aluviossolos Modernos e os Coluviossolos.

De uma forma geral, verifica-se que o uso do solo nesta região se divide, essencialmente, entre uso agrícola, uso agrícola condicionado, uso não agrícola (florestal) e urbano (Áreas sociais/Complexos) (Figura 6.13).



Figura 6.13 – Carta de uso do solo (adaptada de Atlas do Ambiente).

6.2 – HIDROCLIMATOLOGIA

A análise dos factores climáticos e a caracterização do clima é genericamente efectuada a nível regional.

O nível do enquadramento regional, do ponto de vista climático, a zona em estudo insere-se numa região de transição, com características variáveis de acordo com o relevo e exposição. A península de Setúbal constitui, se bem que não directamente, um espaço aberto às massas de ar marítimas. Nesta região incidem assim, em alternância, climas com maior influência atlântica e maior influência continental, coexistindo em espaços fisicamente próximos.

Relativamente à temperatura da região, esta é influenciada pela geografia, oceano Atlântico, serra da Arrábida e estuário do rio Tejo. A proximidade do oceano contribui para atenuar as variações térmicas em toda a região litoral.

Nas zonas mais baixas essa proximidade frequentemente induz a ocorrência de nevoeiros e neblinas, registando-se igualmente nessas áreas humidades relativas mais elevadas.

O estuário do Tejo influencia positivamente as temperaturas anuais médias e as temperaturas nos meses de Inverno. Nos meses de Verão este efeito não é significativo, impondo-se a proximidade do mar como elemento condicionador das temperaturas junto à costa.

A Serra da Arrábida é das três a que exerce influência mais significativa sobre a temperatura. E em termos anuais e mensais o efeito reflecte-se sempre num abaixamento pronunciado da mesma.

Neste contexto, a zona em estudo pode caracterizar-se por possuir um clima temperado, com temperatura média anual a rondar os 17 °C (Figura 6.14).

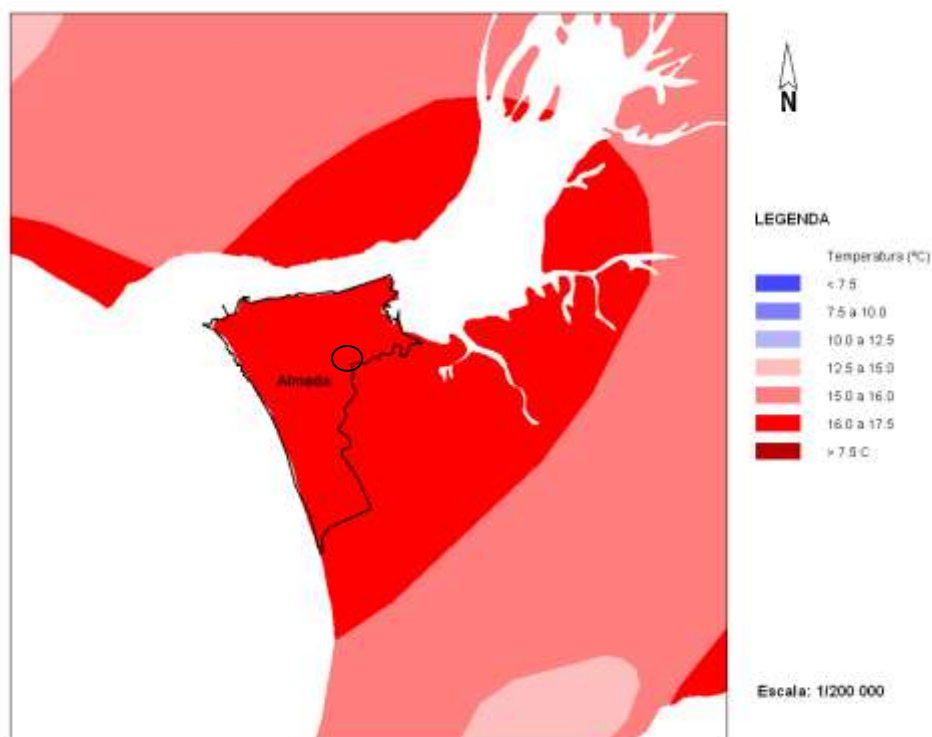


Figura 6.14 - Temperatura média anual do ar (Fonte: adaptado de Atlas do Ambiente).

As temperaturas mais elevadas registam-se nos meses de Verão, normalmente em Julho e Agosto, e as mais baixas no Inverno, nomeadamente nos meses de Novembro, Dezembro e Janeiro.

No que respeita à precipitação, os valores médios anuais rondam os 650 mm (Figura 6.15), ocorrendo apenas em cerca de 90 dias do ano.



Figura 6.15 – Mapa de precipitação média anual (Fonte: adaptado de Atlas do Ambiente).

Existe também uma considerável variação sazonal na quantidade de precipitação, a qual se concentra essencialmente entre Outubro e Março, sendo os meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro os mais pluviosos. No mês de Junho dá-se a transição para o período seco. Sendo os meses menos chuvosos os de Julho e Agosto.

No que se refere ao regime de ventos, o rumo predominante é o de Noroeste, sendo também frequentes os ventos de Sudoeste, Nordeste e Norte, que sopram, quase sempre, de fracos a moderados. No entanto, pode considerar-se na generalidade como

uma zona ventosa, visto que são poucos os dias em que ocorre situação de calma, ou seja, ventos com velocidades inferiores a 1 km/h.

Relativamente à distribuição espacial da insolação na região, observa-se que os valores anuais de insolação se situam entre 2 900 horas a Norte e 3 000 horas a Sul (ICN, 2007). A Norte o estuário do Tejo influencia negativamente o número de horas de sol descoberto, uma vez que a zona intermédia, mais distante do rio, beneficia de mais cerca de 100 horas de sol anuais, comparativamente às zonas ribeirinhas. Em termos mensais, este fenómeno tende a ser menos pronunciado nos meses de verão, onde as temperaturas elevadas da época restringem o fenómeno de condensação associado a grandes massas de água e consequente nebulosidade. A serra da Arrábida influencia a distribuição das horas de sol a descoberto.

6.3 - CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

Os concelhos de Almada e Seixal situam-se sobre o Sistema Aquífero do Tejo-Sado/Margem Esquerda (Figuras 6.16 e 6.17).

De acordo com (Almeida *et al* 2000), na área do Baixo Tejo definiram-se três sistemas aquíferos e são constituídos por formações detriticas pertencentes ao terciário (formações fundamentalmente pliocénicas e miocénicas) e quaternário (aluviões e terraços) que representa o maior sistema aquífero da Península Ibérica.

Toda esta unidade é composta por aquíferos porosos, com excepção da Margem Direita, que devido à natureza litológica é considerada do tipo porosocársico.

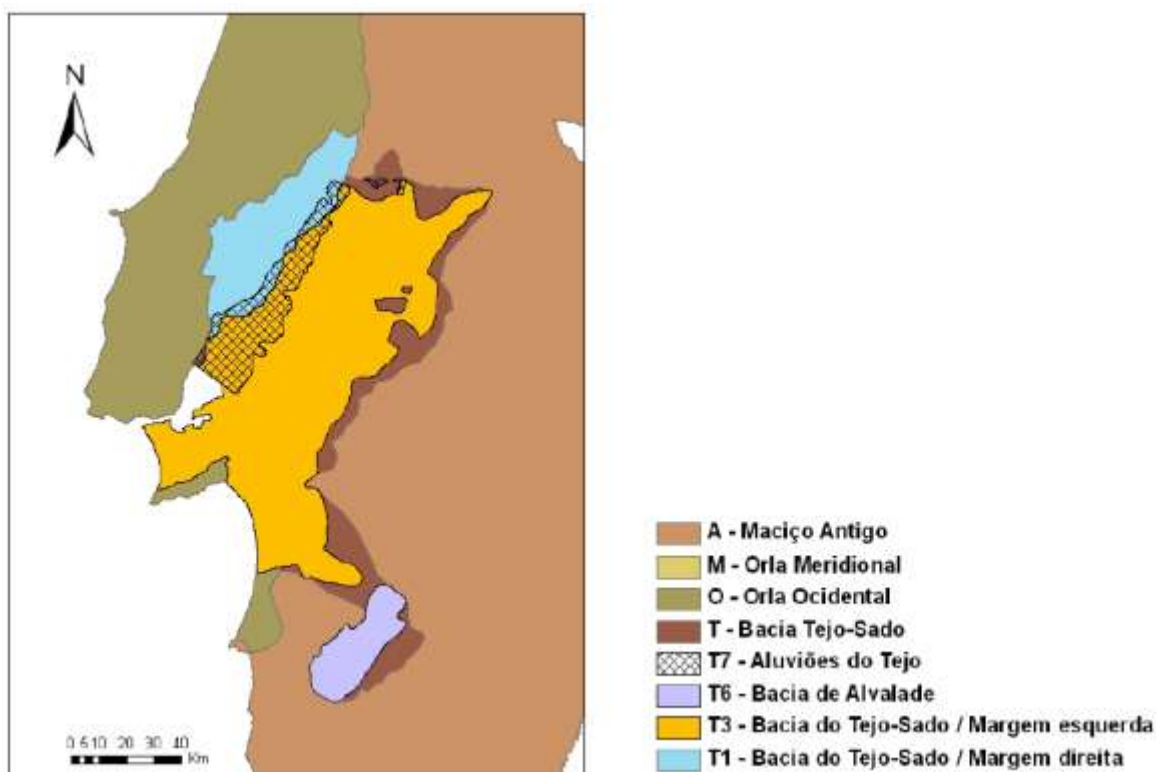


Figura 6.16 – Unidade hidrogeológica morfo-estrutural da Bacia Terciária do Tejo-Sado
(Fonte: adaptado de SNIRH- Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos).

A figura seguinte (fig.17) mostra as formações geológicas aflorantes dos três sistemas aquíferos da bacia do Baixo Tejo. No entanto e embora não seja possível dissociar completamente os três sistemas do aquífero, o âmbito deste trabalho localiza-se sobre o sistema aquífero da Margem Esquerda. Este é constituído fundamentalmente por formações miocénicas, pliocénicas e quaternárias, que tal como o sistema aquífero da Margem Direita, trata-se de um sistema multicamada, onde (Almeida *et al* 2000) individualiza três áreas, livre na parte superior e semi-confinado a confinado em profundidade, caracterizado maioritariamente por formações miocénicas, estando fundamentalmente suportado pelos calcários de Almostrel e os Arenitos da Ota.

Em termos gerais, o escoamento subterrâneo dá-se em direcção ao rio Tejo e ao longo do sistema aquífero até ao oceano Atlântico. Ou seja, das “terras altas” marginais, onde predomina a recarga, em direcção ao Tejo, onde pode descarregar nas aluviões do Tejo, incluindo na zona do estuário, e em direcção ao Oceano (Almeida *et al*. 2000).

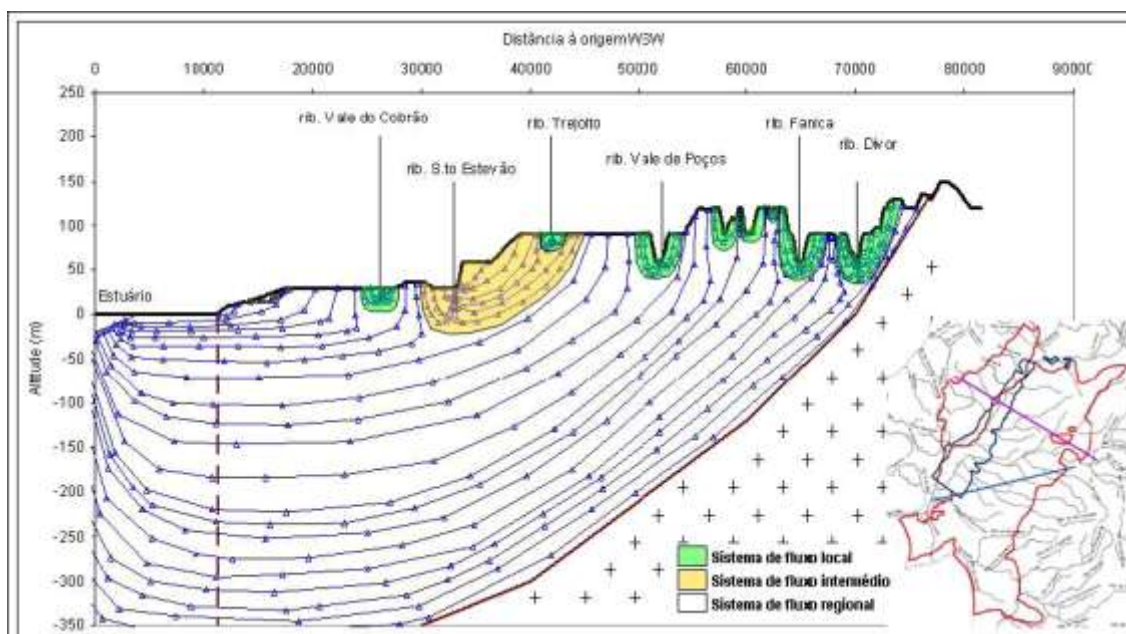


Figura 6.18 – Modelo hipotético do escoamento do sistema aquífero do Baixo Tejo, Margem Esquerda, corte azul (Fonte: Oliveira *et al.* (1999,2001), Lobo Ferreira *et al.*(1999)).

A recarga do sistema aquífero é feita pela precipitação atmosférica e por infiltração nos leitos das linhas de águas, nas zonas mais elevadas do seu percurso na bacia. Admite-se uma recarga na ordem dos 20% a 30% da precipitação média anual. De acordo com os dados do Plano de Bacia Hidrográfica (PBH) do Rio Tejo, a recarga média anual do sistema aquífero em estudo é de cerca de 211 mm/ano, considerando unicamente a recarga produzida pela infiltração da água da chuva na área aflorante do sistema (não se tem em conta a recarga induzida a partir dos cursos de água superficiais) – (INAG 2000; LNEC 2001).

A Tabela 6.1 apresenta, para o sistema aquífero do Baixo Tejo/Margem Esquerda, a recarga média anual e as taxas de recarga. Para Oliveira *et al* (2009), os volumes de recarga apresentados referem-se exclusivamente à recarga por infiltração da água da chuva, que considera “sem dúvida a maior fonte de recarga das águas subterrâneas”.

Tabela 6.1 – Recarga anual média, taxa de recarga e volume anual médio que pode ser extraído
(Fonte: adaptado de Oliveira *et al.* (1999))

Sistema aquífero	Recarga média (mm/ano)	Recarga média (hm ³ /ano)	Precipitação média (mm/ano)	Taxa de recarga média (%)	Volume extraível médio (mm/ano)	Volume extraível médio (hm ³ /ano) (*)
Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda	211	1220	687	31	147	851

(*) Cerca de 70% da recarga estimada

Segundo Oliveira *et al* (2009), a forma de garantir a manutenção do escoamento de base dos cursos de água superficiais dependentes dos sistemas aquíferos e para se ter alguma segurança relativamente ao volume a extrair, deverá considerar-se que a extracção de águas subterrâneas nunca deveria exceder em 70 % o volume anual de recarga média.

Na Figura 6.19 apresenta-se a superfície piezométrica no sistema aquífero da Bacia do Tejo - Sado/Margem Esquerda, com base nos dados obtidos na rede “Quantidade” do SNIRH para o ano hidrológico 2000/2003.

Nas zonas onde existe exploração mais acentuada de água subterrânea constata-se um rebaixamento generalizado dos potenciais hidráulicos perto de Almada, Seixal, mas também no Barreiro e Montijo que se encontra fora da zona de estudo. A presença das referidas depressões na superfície piezométrica, poderá provocar o avanço da frente salina em áreas próximas do litoral (Mendonça, 1992).

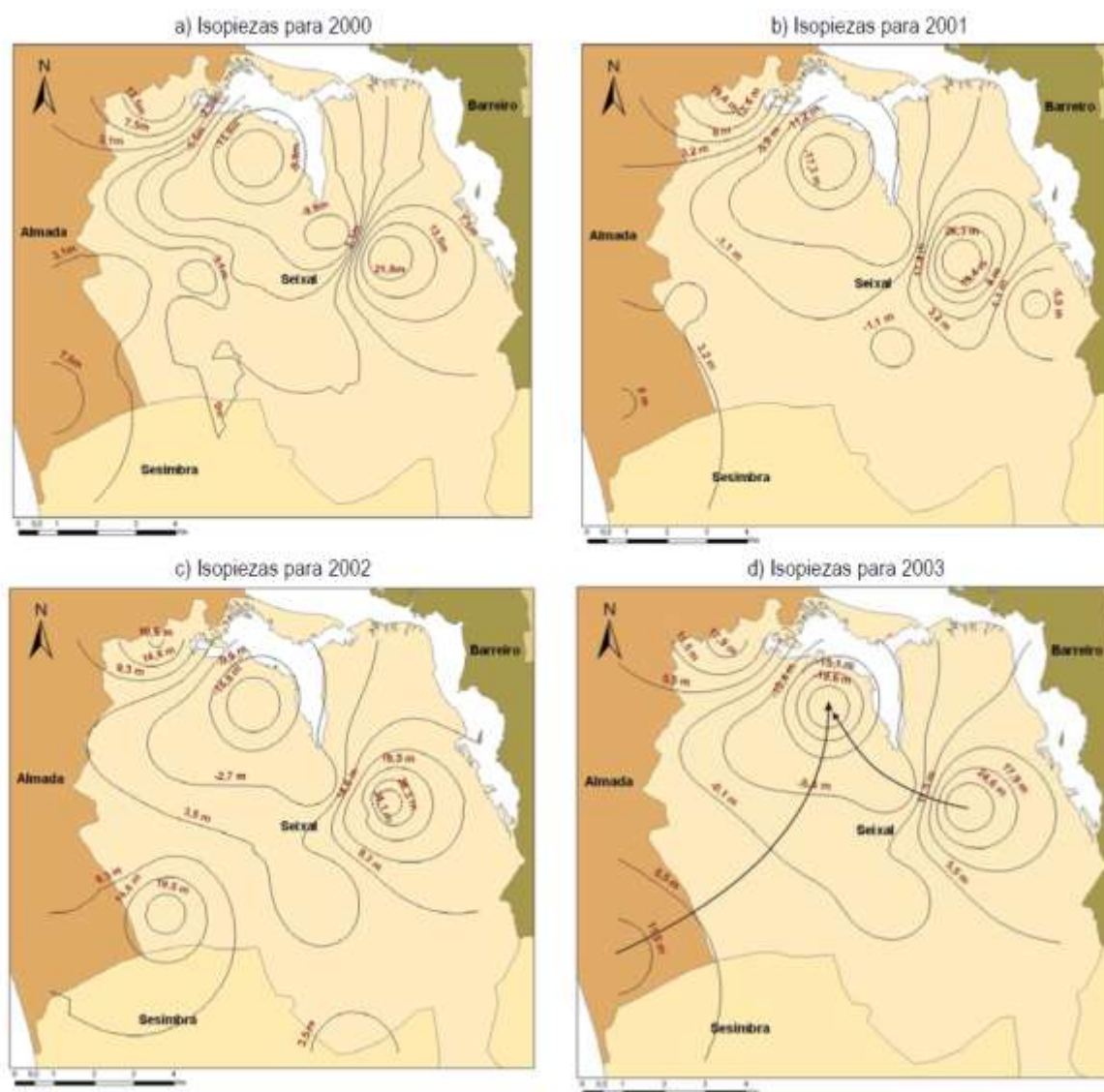


Figura 6.19 – Isopiezas dos níveis hidrostáticos para os anos indicados. Em 2003, indica-se a tendência global do fluxo subterrâneo (Fonte: adaptado do SNIRH- Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos).

Da análise dos valores disponibilizados pelo SNIRH, de parâmetros indicadores de qualidade monitorizados em 2008, verifica-se que os valores paramétricos da qualidade da água que se encontra regulado pelo Decreto-Lei nº 236/98, de 1 de Agosto não são ultrapassados. A título de exemplo apresentam-se os valores dos seguintes parâmetros: Condutividade – 720 μ S (VMR – 1000 μ S); pH – 6.9 (VMR – 6.5 a 8.5), Nitratos – 40.71 mg/l (VMR – 25 mg/l, VMA – 50 mg/l), Cloretos – 98 mg/l (VMR – 200 mg/l); Azoto amoniacal – 0.025 mg/l (VMR – 0.05 mg/l).

6.4 – A BACIA DE CORROIOS

A zona onde está localizada a captação FR1 que se pretende delimitar pertence à bacia de Corroios mais precisamente à sub-bacia da Sobreda, no entanto esta bacia recebe os caudais proveniente de toda a bacia de Corroios, a montante da referida captação.

A bacia de Corroios inclui como linhas de água principais a vala da Charneca e a vala de Corroios, onde se distinguem as sub-bacias de Vale Flores, Guarda-Mor, Sobreda, Regateira, Vale Rosal e Charneca.

Estas sub-bacias têm uma ocupação semi-rural, com percentagem de áreas impermeáveis em regra inferiores a 50% (Figura 6.20).

Tabela 6.2 – Áreas das sub-bacias que afluem à bacia de Corroios.

BACIA DE CORROIOS	
SUB-BACIA	ÁREA (ha)
Vale Flores	115
Guarda-Mor	340
Sobreda	450
Regateira	246
Vale Rosal	117
Charneca	778
TOTAL	2046

A captação do presente caso de estudo encontram-se dentro da zona de cheia da Vala de Corroios que resulta da junção das Valas da Charneca e Sobreda de Caparica que por sua vez resultam da junção das restantes valas de menor dimensão proveniente das referidas sub-bacias.

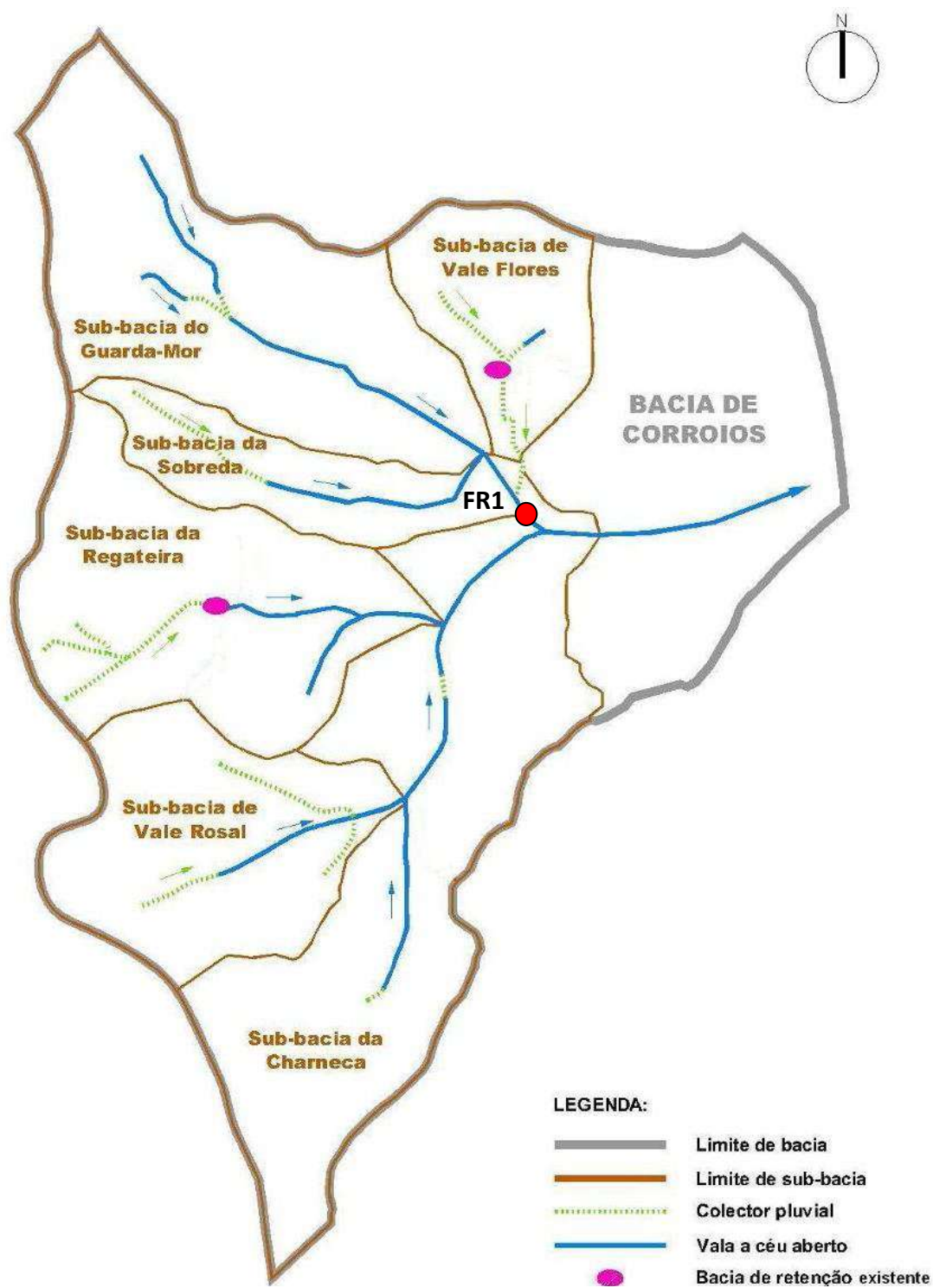


Figura 6.20 – Representação esquemática do sistema de drenagem pluvial actual da bacia de Corroios
(Fonte: adaptado de “Bacias de retenção na bacia de Corroios”, HIDRA, 2009).

6.5 – FUNDAMENTAÇÃO PARA A APLICAÇÃO DOS MÉTODOS SELECIONADOS

Todas as variáveis geológicas e hidrogeológicas, associadas aos meios porosos, impedem que se criem condições para a implementação de um único método para a concepção de perímetros de protecção, sendo oportuno para a aplicação prática dos critérios empregar um ou vários métodos. Deste modo torna-se útil a aplicação de um método que faça uso de vários dados e factores, isto é, um método que envolva vários critérios,

Uma vez que o critério em função da distância apresenta pouca precisão e o critério hidrogeológico não é de fácil implementação os critérios utilizados neste trabalho serão o rebaixamento e o tempo de propagação, uma vez que após uma avaliação preliminar são em termos de considerações técnicas os que apresentam maior facilidade de aplicação, disponibilidade de meios, nomeadamente ao nível de software e de dados disponíveis.

Por um lado o funcionamento observado no sistema aquífero em estudo deve-se à sua estrutura, ao regime hidráulico e à capacidade de armazenamento de água, pelo que a análise minuciosa destes aspectos torna-se básica para a selecção da metodologia de estudo que se deve aplicar. Numa primeira análise pode aceitar-se que no presente caso concreto o meio na sua generalidade é poroso ou similares a um meio poroso ou carbonatado de fluxo difuso. Ou seja considera-se um meio contínuo, homogéneo isotópico.

Por outro lado a numerosa população abastecida em 2011 neste local é superior a 330 000 habitantes além da crise generalizada quer a nível nacional quer internacional que atinge todo o tecido social sendo o distrito de Setúbal um dos mais atingidos pelo desemprego, motivo acrescido para que os custos envolvidos em termos de impacto social e económico resultante do perímetro sejam de suma importância. O que impõem em termos políticos um peso decisivo em termos ordem prioritária no que se concerne a este assunto. Por outro lado as restrições impostas para o uso do território deverão ser definida com clareza, através de um processo robusto que possibilite a sua defesa em situações de conflito.

Nesta perspectiva, para a elaboração do perímetro de protecção das várias captações do presente estudo foi realizada recorrendo à seguinte metodologia:

- 1) Análise dos aspectos geológicos e estruturais da envolvente à captação.
- 2) Estudo da vulnerabilidade do sistema aquífero na envolvente à captação.
- 3) Utilização do Método do Raio Fixo Calculado, para o caso do aquífero confinado e utilizando as fórmulas do decreto-lei nº.382/99 de 22 de Setembro, para os restantes casos admitindo aquíferos porosos, homogéneos e isotópicos.
- 4) Utilização do método de Wyssling, para a determinação do caudal de exploração.

O conhecimento hidrogeológico foi ainda apoiado por um Sistema de Informação Geográfica (SIG), através do software GeoMedia, em especial na georeferenciação com base AutoCad, no desenho de limites, no cálculo de comprimentos de áreas, como na arquitectura final das zonas de protecção, que em muitas situações as áreas correspondentes às várias captações se sobrepõem várias vezes, resultando casos de grande complexidade.

6.6 – MODELO DE CIRCULAÇÃO SUBTERRÂNEA NA ZONA DA CAPTAÇÃO

A partir dos perfis das oito captações referidas (Figura 6.4), foi efectuado o corte apresentado (Figura 6.21), que representa o modelo hipotético de escoamento subterrâneo numa secção do sistema aquífero da Península de Setúbal, entre o Pinhal do Rei e o Mar da Palha no Seixal com a representação das possíveis linhas de fluxo do sistemas de escoamento local.

A captação em estudo é do tipo vertical com a profundidade de 52m e efectuado em meio sedimentar ou poroso, muito comum na zona da Baixa de Corroios (cerca de sessenta captações entre as várias entidades que administram este território), é exclusivamente através deste tipo de captação que é assegurando o abastecimento público de água em aos dois municípios em questão.

Segundo vários estudos realizados o Aquífero do Mio-Pliocénico do Tejo constitui um sistema aquífero multicamada, com comportamento, na globalidade, confinado (fechado), de grande complexidade, em função das características apresentadas ao nível da estrutura geológica, da composição físico-química das águas e dos parâmetros hidráulicos. Pois em todas as situações analisadas o sistema apresenta um comportamento de aquífero confinado.

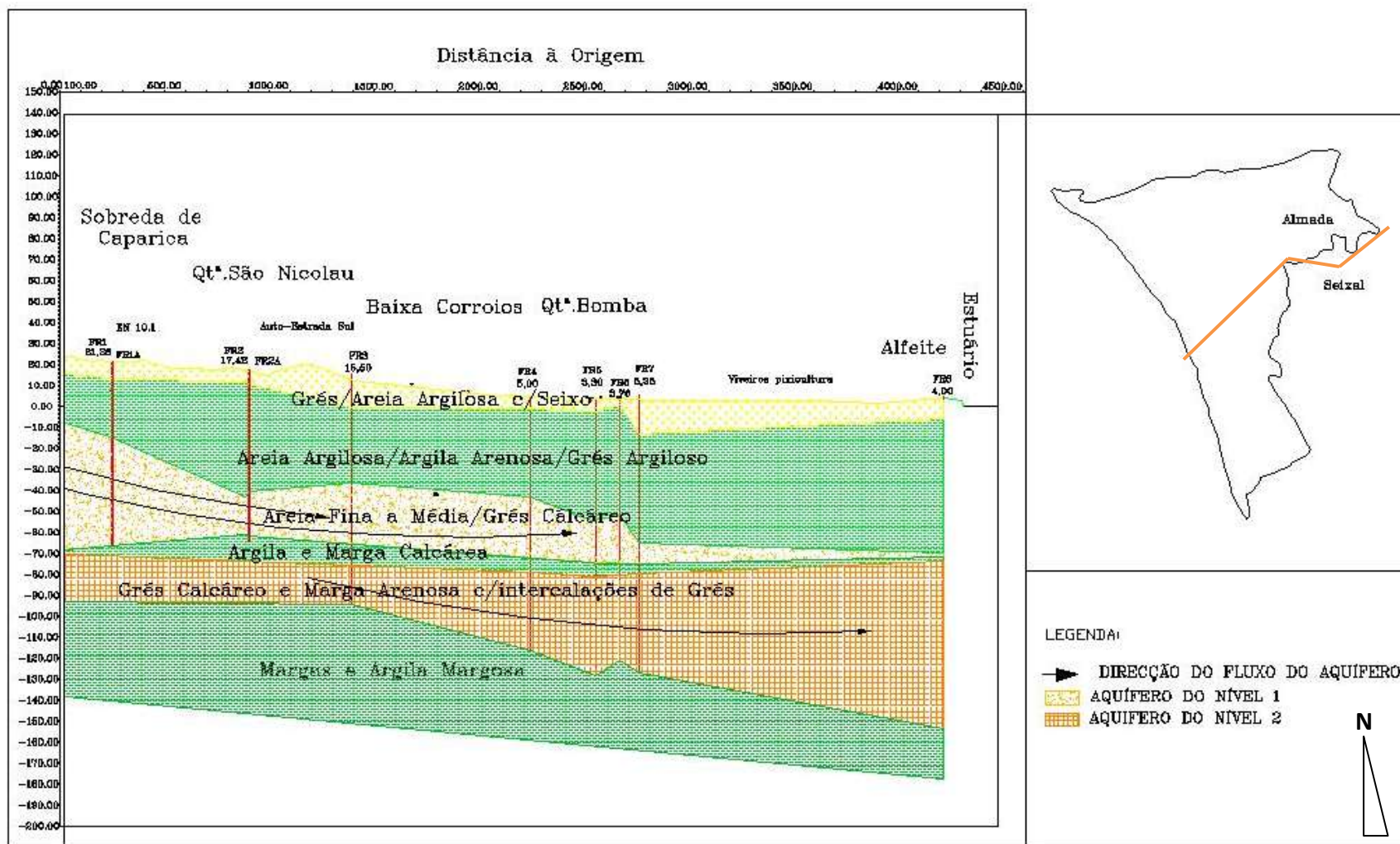


Figura 6.21 – Modelo hipotético do escoamento subterrâneo do sistema aquífero na área em estudo.

6.7 – ETAPAS NECESSÁRIAS PARA A APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

De um modo genérico pode referir-se que a metodologia aplicada para a delimitação do perímetro de protecção da captação em estudo, foi o resultado da aplicação de uma metodologia que se descreve seguidamente.

No estabelecimento da várias zonas do perímetro de protecção, numa 1ª.Fase foi analisada a constituição geológicos e estrutural da envolvente à captação, que permitiu classificar o aquífero em estudo como poroso ou mesmo cársico de fluxo difuso em profundidade, considerando-se no ponto de captação como aquífero confinado.

A 2ª.Fase será desenvolvida no ponto 6.7.1, através do cálculo efectuado através do índice DRASTIC, para determinação da vulnerabilidade do sistema de aquífero envolvente à captação.

A 3ª. Fase consiste em. aplicar o método do raio fixo calculado com as limitações impostas pelo decreto-lei 382/99.

A 4ª.Fase consiste em verificar através do método de Wyssling (largamente utilizado para o calculo de perímetros de protecção de aquíferos porosos na Europa), qual o caudal de exploração máximo admitido para que sejam garantidos os limites de área impostos pelo decreto-lei 382/99 que não toma em consideração os caudais de exploração, tal como o Método do Raio Fixo Calculado em que se baseia.

A 5ª. Fase têm por objectivo principal calibrar a metodologia aplicada anteriormente, e consiste em aplicar um Método Numérico de Fluxo e Transporte, nomeadamente através do software MODFlow.

Finalmente será efectuada a comparação entre as várias metodologias aplicadas, a fim de efectuar uma análise racional através dos resultados obtidos e das considerações técnicas, económicas sociais ou outras. Esta análise deverá permitir efectuar uma interpretação clara e sistemática dos resultados que servirão de base e fundamento adequado para a defesa das áreas propostas para delimitação das várias zonas de protecção da captação.

Na Tabela 6.3, são apresentados os principais parâmetros que caracterizam varias captação do local entre as quais a captação FR1, à qual será aplicada a metodologia seleccionada.

Será ainda aplicada a mesma metodologia a mais duas captações cujos parâmetros base fogem ligeiramente dos limites de aplicação da metodologia, nomeadamente a espessura do aquífero que tem como valores ideais, entre 50 e 100m, no entanto de acordo com o ajuste efectuado ao caudal de exploração através do método de Wyssling, é possível aplicar esta metodologia para espessuras inferiores, tal como se demonstra neste trabalho.

Tabela 6.3 – Características das captações em estudo.

Captação		FR1	FR1A	FR2	FR2A	FR3	FR3A	FR4	FR5	FR6	FR7
Características	Cota topográfica (m)	21,26	21,26	17,42	17,42	15,5	15,5	5	3,3	3,76	5,35
	Nível Hidrostático (m)	-6,79	-25,04	-7,33	(1)	-9,5	-9,5	-22,36	-29	-22,4	(2)
	Nível Hidrodinâmico (m)	-16,94	-58,74	-30,48	(1)	-42,19	-42,19	-41,45	-45,29	-37,44	(2)
	Rebaixamento (m)	10,15	33,7	23,15	(1)	32,69	32,69	19,39	-16,29	15,04	(2)
	Caudal Exploração (m³/dia)(*)	864	(1)	1036,8	(1)	748,8	(2)	2304	2304	1440	(2)
	Caudal Recomendado (m³/dia)	892,8	558,7	892,8	(1)	892,8	558,7	558,7	558,7	558,7	558,7
	Espessura do aquífero - b (m)	52	(1)	18	(1)	35	115	142	172	186	180
	Transmissividade - T (m²/dia)	92	(1)	16	(1)	47	115	142	172	186	180
	Permeabilidade - K (m/dia)	1,77	(1)	0,89	(1)	1,34	1	1	1	1	1
	Coef. Armazenamento - S (m/dia)	6x10 ⁻⁴	10 ⁻³	6x10 ⁻⁴	(1)	6x10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³
	Porosidade eficaz (me) (%)	3,6	-	3,6	-	3,6	-	-	-	-	-
	Gradiente hidráulico – i (m/m)	0,0077	-	0,0077	-	0,0077	-	-	-	-	-
	Tipo de aquífero	Confinado	Livre	Confinado	Livre	Confinado	Livre	Livre	Livre	Livre	Livre
	Aquífero (**)	1	2	1	2	1	2	2	2	2	2

(*) Para um período de 16 h

(**) Referente a legenda da Figura 6.22

(1) Em início de exploração

(2) Em manutenção

6.7.1 – CARACTERIZAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO

Antes de se iniciar a determinação dos perímetros de protecção será efectuada a avaliação da vulnerabilidade do sistema aquífero, conforme se mostra na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Calculo da Vulnerabilidade do aquífero através do índice DRASTIC.

Captações		FR1	FR2	FR3	FR4	FR5	FR6	FR7
Parâmetro	Peso							
D	5	5	5	5	5	5	5	5
R	4	24	24	24	24	24	24	24
A	3	18	18	18	24	24	24	24
S	2	8	8	8	6	6	6	6
T	1	10	10	10	10	10	10	10
I	5	15	15	15	15	15	15	15
C	3	30	30	30	30	30	30	30
Índice Total		110	110	110	114	114	114	114

A título de exemplo, para a captação FR1 obteve-se para o parâmetro D o valor 1, que afectado pelo seu peso obtêm-se o valor 5. Do mesmo modo para o parâmetro R obteve-se o valor 6, afectado pelo respectivo peso obtêm-se 24. Para o parâmetro A, também 6, o parâmetro S, o valor 4, para T o valor 10, para I o valor 3 e para C o valor 10, estes valores afectados dos respectivos pesos obtêm-se os valores apresentados na Tabela 6.4.

Uma vez que os índices obtidos na tabela 6.6, são inferiores a 120, de acordo com a descrição efectuada no Capítulo 4 deste trabalho sobre o Método DRASTIC, considera-se baixa a vulnerabilidade à contaminação para o sistema de aquíferos em estudo.

6.7.2 – PARÂMETROS HIDRÁULICOS

De seguida serão apresentados alguns parâmetros hidráulicos na área em estudo nos quais se baseiam os cálculos efectuados nos pontos seguintes.

Tabela 6.5 – Parâmetros hidráulicos apresentados por Almeida *et al* (2000) calculados a partir de furos submetidos a ensaio de bombagem.

ALMEIDA <i>et al.</i> 2000			
Por Ensaio de Bombagem			
	Nº de Ensaio de Bombagem	Transmissividade, T(m ² /s)	Coeficiente de Armazenamento, S
Pliocénico	15	1x10 ⁻³ a 3x10 ⁻²	-
Miocénico Cont.	2	1,5x10 ⁻³ a 5x10 ⁻³	-
Miocénico Marinho	2	2x10 ⁻² a 4x10 ⁻²	1x10 ⁻³
Por Caudais Especificos			
	Nº de Caudais Especificos	Transmissividade, T(m ² /s)	Valores mais freq. de T (m ² /s)
Pliocénico	135	2x10 ⁻⁴ a 2x10 ⁻²	1x10 ⁻³ a 4x10 ⁻³
Miocénico Cont.	176	3,5x10 ⁻⁵ a 2x10 ⁻²	5x10 ⁻⁴ a 2x10 ⁻³
Miocénico Marinho	101	3x10 ⁻⁴ a 5x10 ⁻²	1x10 ⁻³ a 8x10 ⁻³
Almada, Seixal e Barreiro ¹	?	1x10 ⁻²	?

(1) Valores específicos para esta região, calculados por D'Orval (*in* Almeida *et al.* 2000)

Nota: Pliocénico e Miocénico corresponde respectivamente ao aquífero 1 e 2 da tabela 6.3.

Tabela 6.6 – Parâmetros hidráulicos apresentados pela EPAL (1996) calculados a partir de furos de captação submetidos a ensaios de bombagem.

EPAL, 1996				
Por Ensaio de Bombagem de A.Cavaco, EPAL, Mendonça (1990) e Hidrotécnica Portuguesa (1992):				
	Transmissividade, T(m ² /s)	Permeabilidade, K (m/s)	Espessura, b (m)	Coeficiente de armazenamento, S
Aluviões recentes	7x10 ⁻²	6x10 ⁻⁴ a 2x10 ⁻³	10 a 35	-
Quaternário	3x10 ⁻³	3x10 ⁻⁴	0 a 30	-
Pliocénico	5x10 ⁻³ a 1x10 ⁻²	5x10 ⁻⁵ a 2x10 ⁻⁴	50 a 100	6x10 ⁻⁴
Miocénico Marinho	1 a 3x10 ⁻²	1 a 2x10 ⁻⁴	-	-
Miocénico Cont. , (1) margem direita e orla leste	0,5 a 2x10 ⁻³	0,5 a 1x10 ⁻⁵	-	-
Miocénico Cont. , (2) zona mediana ao longo do eixo da bacia	1 a 4x10 ⁻²	1x10 ⁻⁴	-	-
Miocénico Cont. , sector intermédio entre os conjuntos (1) e (2)	2x10 ⁻³ a 1x10 ⁻²	1x10 ⁻⁴	-	-

6.8 – DEFINIÇÃO DOS PERÍMETROS DE PROTECÇÃO

A partir do modelo representado na Figura 6.22, foi efectuado o cálculo das zonas de protecção imediata, intermédia e alargada do furo de captação FR1, que se encontra a captar no aquífero 1, que se admitiu confinado para efeitos do presente estudo.

Conforme referido anteriormente os cálculos foram realizados por vários métodos com o objectivo de fazer a comparação entre os mesmos, para que se possa concluir qual o melhor método a aplicar na situação que se apresenta no caso de estudo, conforme se apresenta na Tabela 6.7. Foi também aplicada a metodologia referida a mais duas captações a fim de obter um maior numero de dados significativos para que sirvam de base de comparação e afinação da metodologia.

Tabela 6.7 – Perímetros de protecção de três captações que se encontram a captar no aquífero confinado.

Captação		FR1			FR2			FR3		
Método		R.F.C.	Wyssling	M.N	R.F.C.	Wyssling	M.N	R.F.C.	Wyssling	M.N
Perímetro	Imediato	8,6 < r < 20 m 20x17,2m	127,4x6,4m	310x170 m	8,5 < r < 20m 20x17m	113,5x4,3 m	221x175 m	9,7 < r < 20 m 20x19,4	114,1x5,3m	206x198 m
	Intermédio	20 < r < 40m 40x20m	131x14m		20 < r < 40m 40x32m	116,1x9,3 m		20 < r < 40m 40x20m	117,1x11,4m	
	Alargada	57,4 < r < 350m 350x114,8m	188,7x129m		38,5 < r < 350m 350x77,1m	153,4x83,9 m		47,3 < r < 350 m 350x94,3m	164x105,1m	

Zona de protecção imediata

A zona de protecção imediata foi calculada por dois métodos já referidos anteriormente, o método do Raio Fixo Calculado e o Método de Wyssling, neste caso com alguns ajustes, ou seja uma vez que este último método depende directamente do caudal de exploração e como para o caudal dado o perímetro obtido é muito superior aos 350m para que houvesse termo de comparação, adoptou-se o caudal de exploração de 553m³/dia.

No primeiro método adoptou-se o menor valor calculado para o período de 50 dias de acordo com os valores estipulado pelo decreto-lei nº.382/99.

No cálculo efectuado através do método de Wyssling, a zona de protecção imediata foi calculada para um período de 11 dias.

No entanto e de uma forma geral o perímetro de protecção imediata calculado pelo método de Wyssling é superior em cerca de uma vez e meia ao mesmo perímetro calculado pelo processo do Raio Fixo Calculado.

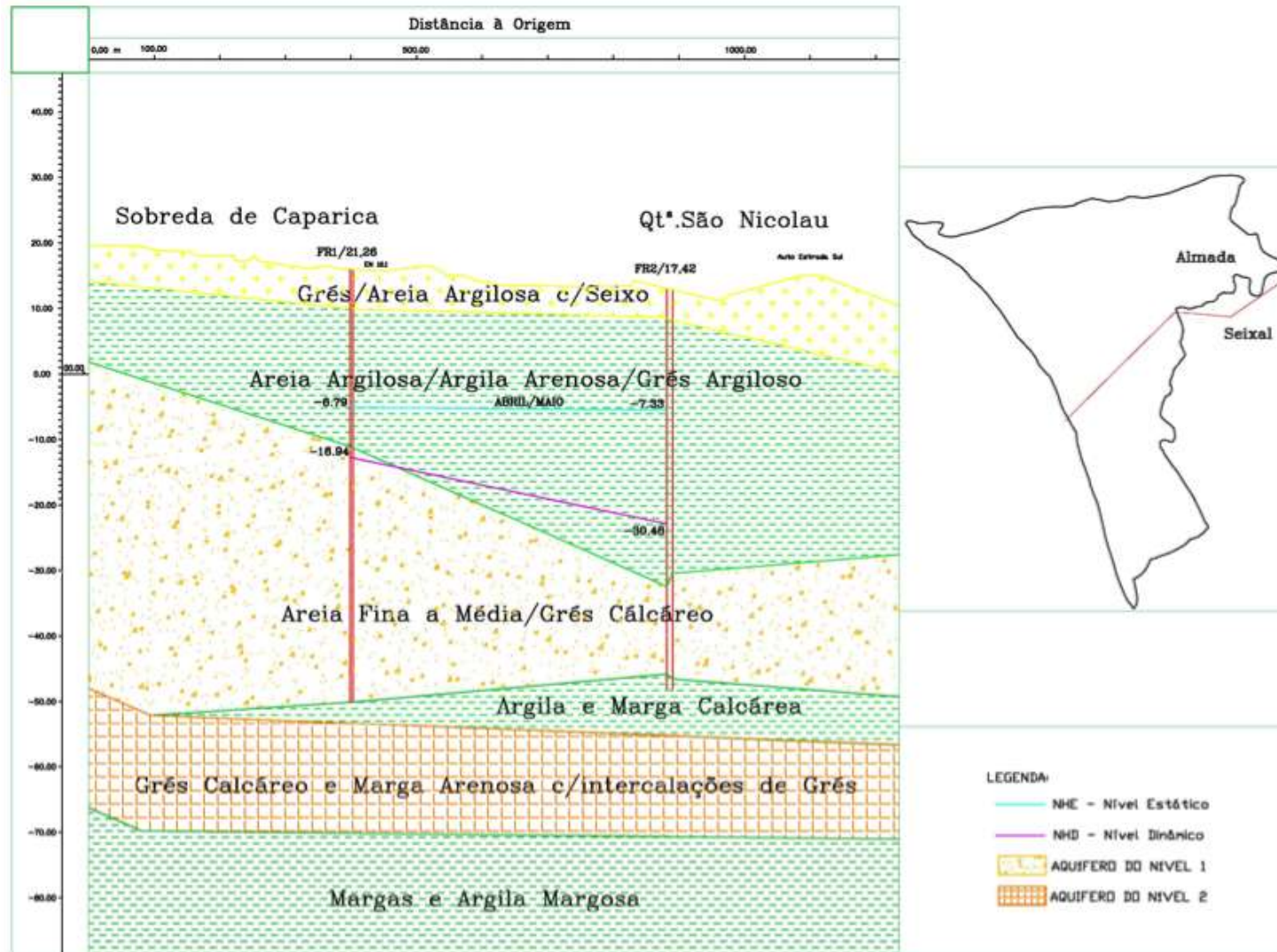


Figura 6.22 – Modelo hipotético do escoamento do sistema aquífero confinado da área em estudo.

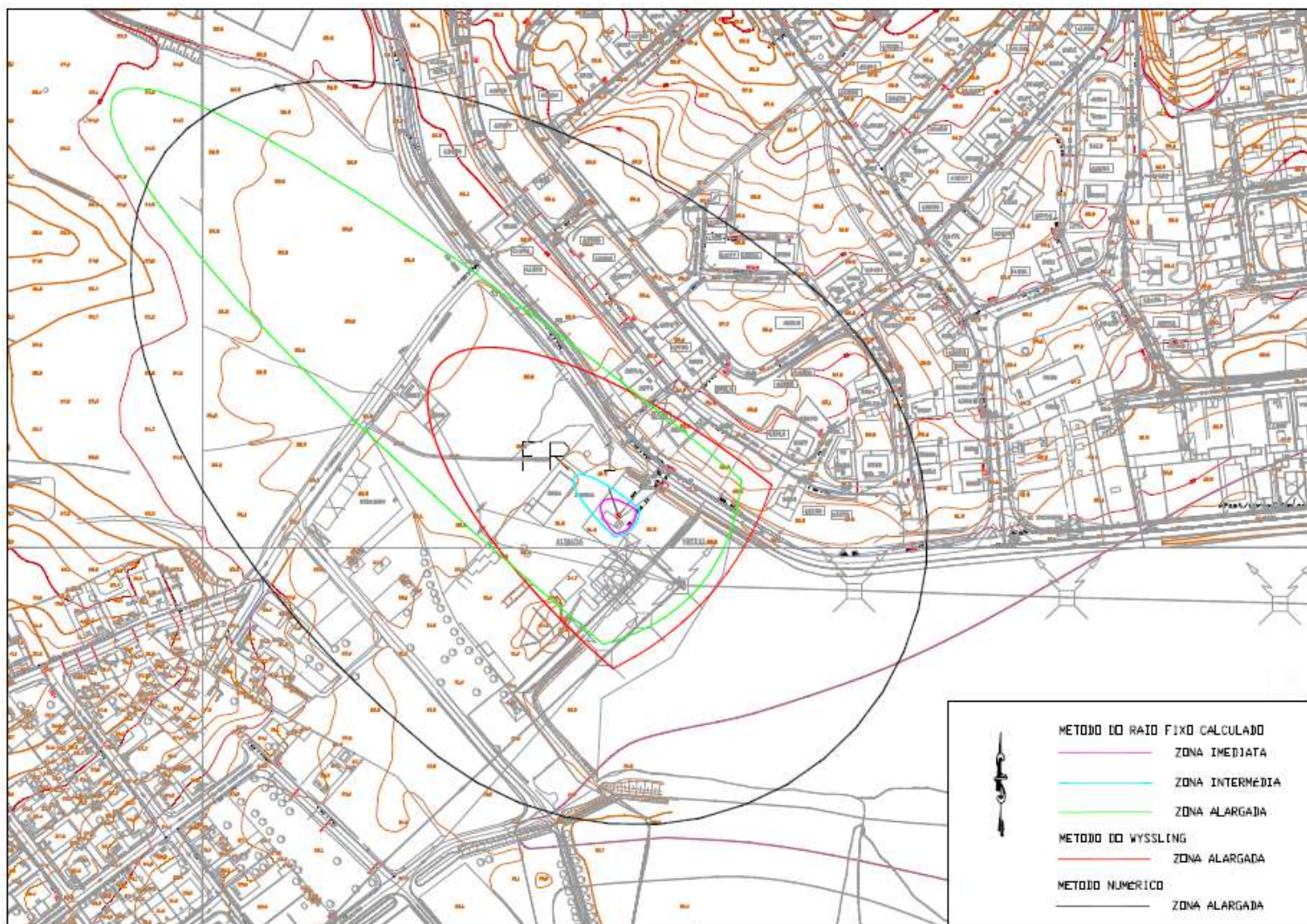


Figura 6.23 – Planta com a definição do perímetro de protecção da captação FR1 pelos vários métodos.

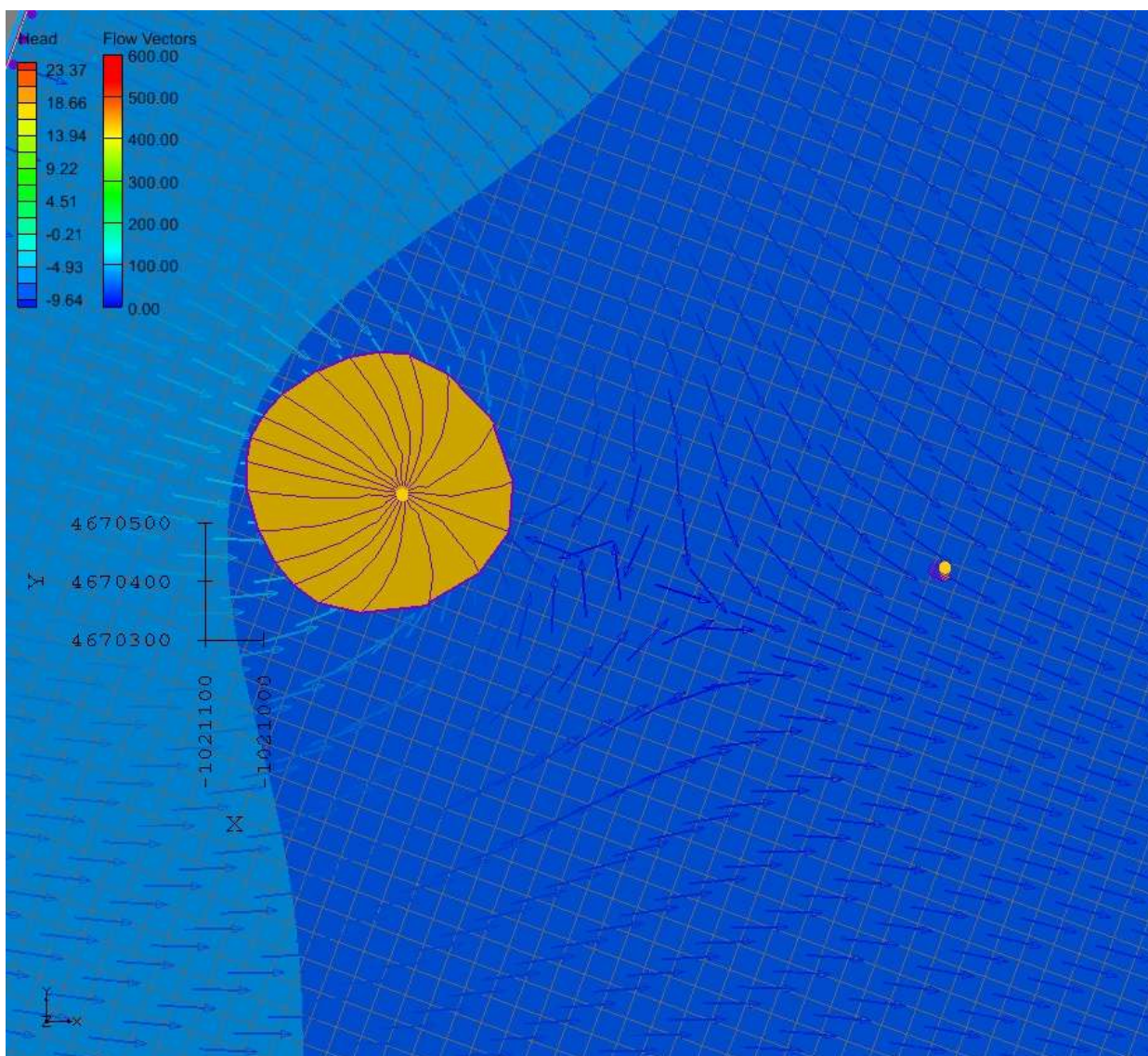


Figura 6.24 – Planta com a definição do perímetro de protecção alargado da captação FR1, efectuado a partir do método numérico de fluxo e transporte de partículas com base na velocidade da água. Modelação matemática com MODFLOW (2005). Figura cedida por Mancuso, M.A. em 2011.

Zona de protecção intermédia

A zona de protecção intermédia do mesmo modo foi calculado pelos dois processos seleccionados, que em ambos os métodos foram calculados para um período de trânsito de 50 dias, tendo para o caso do raio fixo calculado o limite inferior definido pelo máximo do perímetro imediato e o limite superior pelo definido no decreto-lei nº382/99.

Também neste caso o perímetro intermédio calculado pelo primeiro método é cerca de uma vez e meia inferior ao calculado pelo método de Wyssling.

Zona de protecção alargada

A zona de protecção alargada foi calculada pelos dois métodos referidos para o período de trânsito de 3500 dias, sendo no caso do raio fixo calculado o limite máximo de 350m de acordo com o estipulado no decreto-lei 382/99, adoptando o mesmo caudal de exploração utilizado para o método de Wyssling.

Porem no caso da zona alargada o perímetro calculado pelo método de Wyssling é metade do calculado pelo método do raio fixo calculado.

6.9 – CALIBRAGEM DO MÉTODO APLICADO

De seguida na Tabela 6.8 é efectuada a comparação entre os vários métodos utilizados em captações que se encontram a explorar o mesmo nível aquífero a fim de se poder aferir qual a metodologia mais adequada.

Para essa comparação foi utilizada a zona de protecção alargada, por apresentar o valor mais significativo. Uma vez que os perímetros imediatos e intermédios representam uma área pouco significativa que em principio não apresentará grandes impactos e conflitos na sua implementação.

Tabela 6.8 – Comparação dos perímetros de protecção de três captações do caso de estudo.

Captação		FR1			FR2			FR3		
Método		R.F.C.	M.A.	M.N.	R.F.C.	M.A.	M.N.	R.F.C.	M.A.	M.N.
Parâmetro de comparação		Função do tempo de trânsito	Método Wyssling	Fluxo e transporte de massa	Função do tempo de trânsito	Método Wyssling	Fluxo e transporte de massa	Função do tempo de trânsito	Método Wyssling	Fluxo e transporte de massa
Percentagem de área protegida comum (Ac)		112,9%	60,9%	100%	158,4%	69,4%	100%	169,9%	79,6%	100%
Percentagem de área sem protecção (B)		0%	39,1%	0%	0%	30,6%	0%	0%	20,4%	0%
Percentagem de área protegida sem ser necessária (C)		12,9%	0%	0%	58,4%	0%	0%	69,9%	0%	0%
CA	Tipo	Confinado			Confinado			Livre		
	Materiais	Calcários e Arenitos			Calcários e Arenitos			Calcários e Arenitos		
	Espessura saturada	b = 52 m			b = 18 m			b = 35 m		
	Transmissividade	T = 92 m ² /dia			T = 16 m ² /dia			T = 47 m ² /dia		
	Permeabilidade	K = 1,77 m/ dia			K = 0,88 m/ dia			K = 1,34 m/ dia		
	Gradiente	Baixo (i = 0,0077)			Baixo (i = 0,0077)			Baixo (i = 0,0077)		
	Proximidade ao limite de fluxo da captação	Não			Não			Não		
	Entradas	Infiltração da pluviosidade			Infiltração da pluviosidade			Infiltração da pluviosidade		
	Saídas	Extracção			Extracção			Extracção		

Legenda: R.F.C.: Raio fixo calculado

M. A.: Métodos Analíticos

M.N.: Métodos numéricos

CA: Características do aquífero

Percentagem da área protegida comum (Ac) $Ac = (Ac)/P \times 100\%$ Percentagem da área sem protecção (B) $B=B/P \times 100\%$ Percentagem da área sem protecção (C/C) $C/C = (C-Ac)/P \times 100\%$

Podemos concluir pela análise do quadro anterior que pelo método do raio fixo calculado obtêm-se um perímetro de protecção em regra superiores ao calculado pelo método numérico. Enquanto que pelo método de Wyssling obtêm-se um perímetro de protecção sempre inferior ao calculado pelo método numérico. Isto limitando o caudal de exploração à distancia máxima prevista no Decreto-lei nº.382/99 para a zona de protecção alargada.

Podemos também verificar através da figura seguinte (6.25), que a área de captura de um furo interfere nas áreas de captura dos furos próximos. Quanto maior for o caudal de exploração, maior será a área de captura (há competição pela água entre os furos).

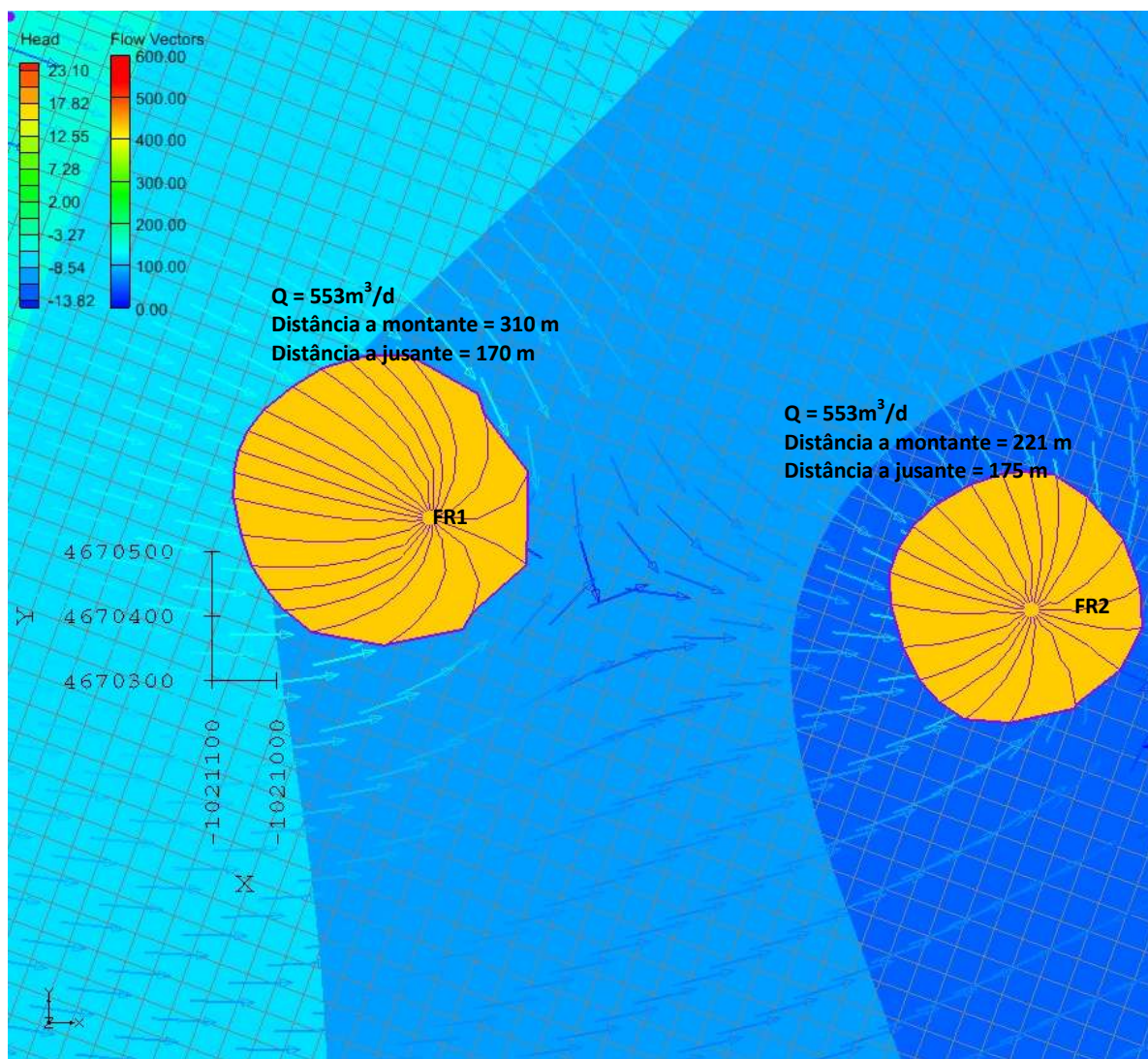


Figura 6.25 – Planta com Indicação do perímetro de protecção alargado das captações FR1 e FR2 ($Q = 553 \text{ m}^3/\text{d}$) para 3500 dias de percurso de partículas (MODPATH). Modelação matemática com MODFLOW (2005). Figura cedida por Mancuso, M.A. em 2011.

A Tabela 6.3 apresenta os parâmetros hidráulicos utilizados no modelo numérico. A geometria dos aquíferos foi definida com base no perfil geológico indicado na Figura 6.21.

No caso de FR3 (206x198), a área é menos oval (mais redonda), neste local o aquífero é mais profundo e os rebaixamentos com os caudais de exploração são inferiores aos obtidos nos ensaios de bombagem para NHD. Considera-se que cada captação deverá ser avaliada isoladamente e calibrado o modelo antes da obtenção do valor final.

6.10 – IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA NO TERRENO

De acordo com o decreto-lei nº382/99 de 22 de Setembro, artigo 9º, os perímetros de protecção depois de devidamente delimitados, devem ser incorporados nos planos de bacia hidrográfica, nos planos directores municipais e nos planos especiais de ordenamento do território.

Uma vez que o local onde se insere o presente caso de estudo é densamente povoado com pressões sobre o uso do solo bastante acentuadas, a sua implementação poderá acarretar alguns custos e inconvenientes para a comunidade local.

O referido decreto-lei estabelece, como condições necessárias para a implementação de perímetros de protecção, a existência de captações direccionadas para o abastecimento público de aglomerados populacionais superiores a 50 000 habitantes, ou onde o caudal de exploração seja superior a 100m³/dia. Contudo, embora a captação em estudo, só por si não exceda as condições impostas pela lei, em conjunto com outras captações que se localizam numa área de cerca de 27 Ha, abastecem um número de habitantes que se estima neste momento em cerca de 340 000 habitantes. Pela metodologia estabelecida algumas das captações, em especial devido às limitações impostas pelas pressões sobre o uso do solo, deveriam reduzir o caudal de exploração.

Deste modo, os resultados obtidos através da definição dos perímetros de protecção, com recurso ao método do *Raio Fixo Calculado* com previa limitação do caudal de exploração pelo método de Wissling, serviram acima de tudo como excelente ensaio para satisfação da eventual necessidade de preservação do aquífero e desafios futuros, quer para a captação em estudo, quer para que a sua utilização possa ser aplicada às várias dezenas de captações existentes neste local. Do presente estudo obtiveram-se resultados satisfatórios em termos de área, efectuando ao mesmo tempo a limitação e controlo dos caudais de explorações, cuja gestão deverá ser efectuada em função das necessidades da população abastecida e da gestão adequada do território e dos solos.

Certamente irão surgir casos mais simples ou mais complexos, no entanto é de admitir que a presente metodologia com as devidas especificações poderá em geral ser adaptado a todas as captações do aquífero Mio-Pliocénico do Tejo. Prevendo-se que eventualmente possa ocorrer a sobreposição de algumas delimitações (delimitação de

perímetros de protecção) em especial nos recintos em que existe mais de uma captação, devido por exemplo ao facto de se encontram a captar em níveis aquíferos diferentes, estando em crer que neste caso um dos perímetros deverá absorver por completo o raio de acção da outra captação. Ou seja no caso de estudo em que existem duas captações no mesmo recinto a captar num aquífero livre e num aquífero confinado, de uma forma muito simplista prevê-se que deverá prevalecer o perímetro de protecção da captação que se encontra a captar no aquífero livre.

A implementação no terreno dos perímetros de protecção determinados, além das condicionantes económicas e sociais referidas, com especificidades locais acentuadas, obriga a demarcação efectiva, física e topograficamente no terreno, os limites estabelecidos de forma inequívoca. No caso do perímetro imediato, este deverá corresponder ao recinto da captação a ser vedado e adequadamente conservado. Para os restantes limites poderá não ser necessária a vedação efectiva, mas a sua demarcação cartográfica, deverá ser feita de modo a definir os usos do solo previstos nos planos de gestão do território.

6.11 – PERÍMETROS DE PROTECÇÃO NA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS E PLANIFICAÇÃO DO TERRITÓRIO

Os riscos associados às águas captadas estão directamente relacionadas com a poluição urbana resultante de infra-estruturas de drenagem de águas residuais que, pela sua extensão, torna onerosa a sua manutenção. Também por outro dado a impermeabilização dos solos, a recolha e condução das águas pluviais para o rio, reduzindo a infiltração comprometem a recarga do sistema aquífero. É cada vez mais evidente que não basta as entidades gestoras de água e saneamento prestarem um serviço público eficiente e adequado, mas também devem velar por uma eficiente gestão do território e boas práticas ambientais. Uma vez que a deterioração do recurso que gere irá influenciar muito directamente a qualidade de vida das populações.

Sem uma gestão sustentável, o que antes era um local apazível, rapidamente perde as suas qualidades e torna-se inóspito e impróprio para habitar. Neste contexto, o

desempenho das entidades gestoras é cada vez maior e mais exigente, encontrando-se mesmo nas suas mãos a persecução dos recursos que explora ou sobre os quais intervêm directamente e que encerram em si mesmo um poder que pode criar ou destruir o ambiente e a vida de uma região.

Em conformidade com a NP EN752:2009, a relação entre os objectivos e os requisitos funcionais, e o processo para a determinação de requisitos de desempenho segue uma abordagem que se apresentam na Tabela 6.9 e Figura 6.25.

Tabela 6.9 - Relação entre os objectivos e os requisitos funcionais de exploração de sistemas de drenagem e abastecimento de água às populações (adaptado de NP EN752:2009).

Secção	Saúde e segurança do público	Saúde e segurança no trabalho	Protecção ambiental	Desenvolvimento sustentável
Protecção contra as inundações	XXX	XX	XXX	-
Capacidade de manutenção	XX	XXX	XX	XX
Protecção dos meios receptores hídricos de superfície	XXX	X	XXX	XX
Protecção das águas subterrâneas	XXX	-	XXX	XXX
Prevenção dos odores e da formação de gases tóxicos, explosivos e corrosivos	XXX	XXX	XXX	XXX
Prevenção do ruído e das vibrações	XX	XXX	X	X
Utilização sustentável dos produtos e dos materiais	-	-	XX	XXX
Utilização sustentável da energia	-	-	XX	XXX
Integridade estrutural e duração de vida prevista no projecto	XXX	XXX	XXX	XXX
Manutenção do escoamento	XXX	-	XXX	X
Estanquidade à água	XXX	X	XXX	XX
Ausência de perigo para as estruturas e os serviços de utilidade pública vizinhos	XXX	XXX	X	XX
Qualidade das águas residuais admitidas	XX	XXX	XXX	XX

NOTA: XXX é elevado;

X é baixo;

- não está relacionado.

Para a determinação dos requisitos de desempenho assumem papel relevante os condicionalismos e condições exteriores, legais, sociais e ambientais, e as condições

limite ou fronteiras, que se relacionam com a origem e natureza dos afluentes, e com os meios receptores.

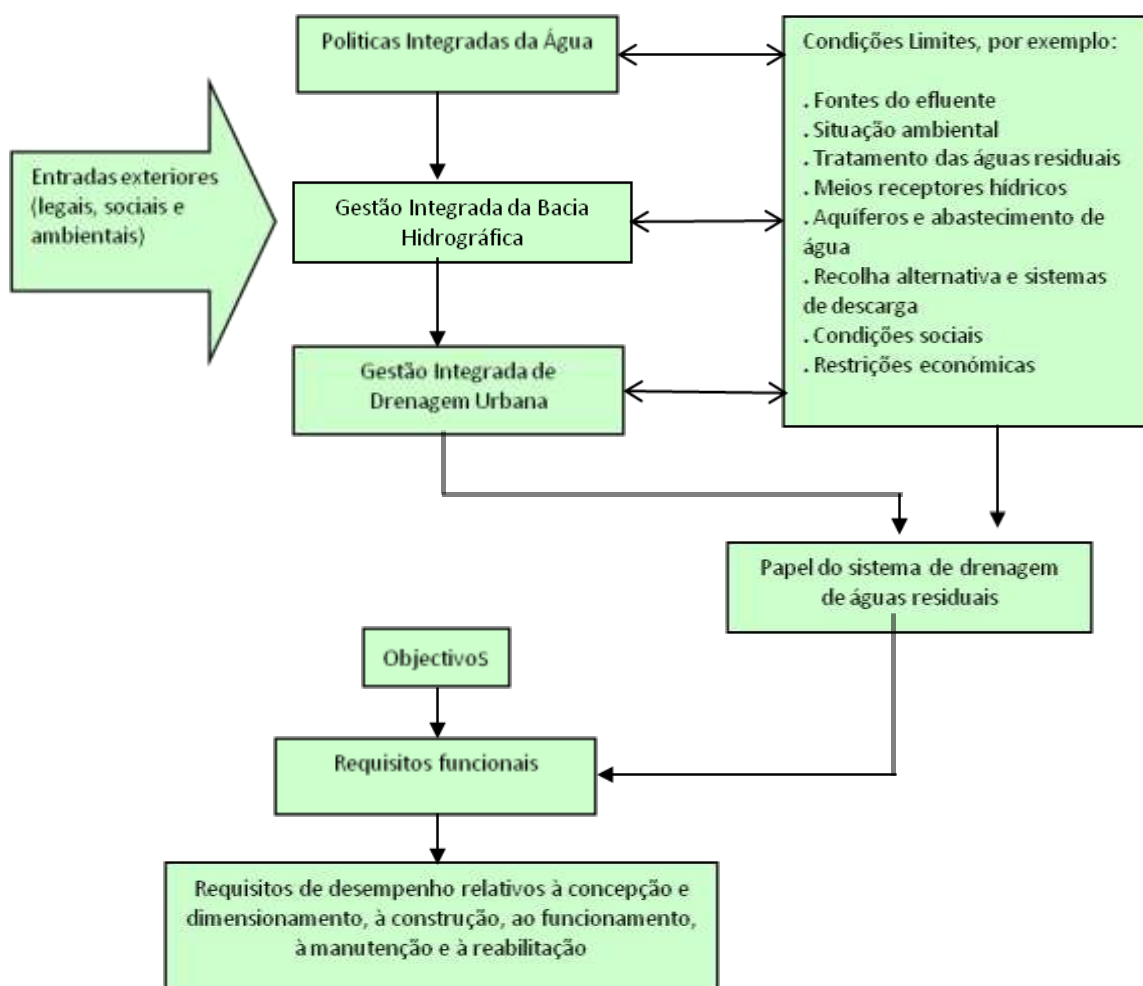
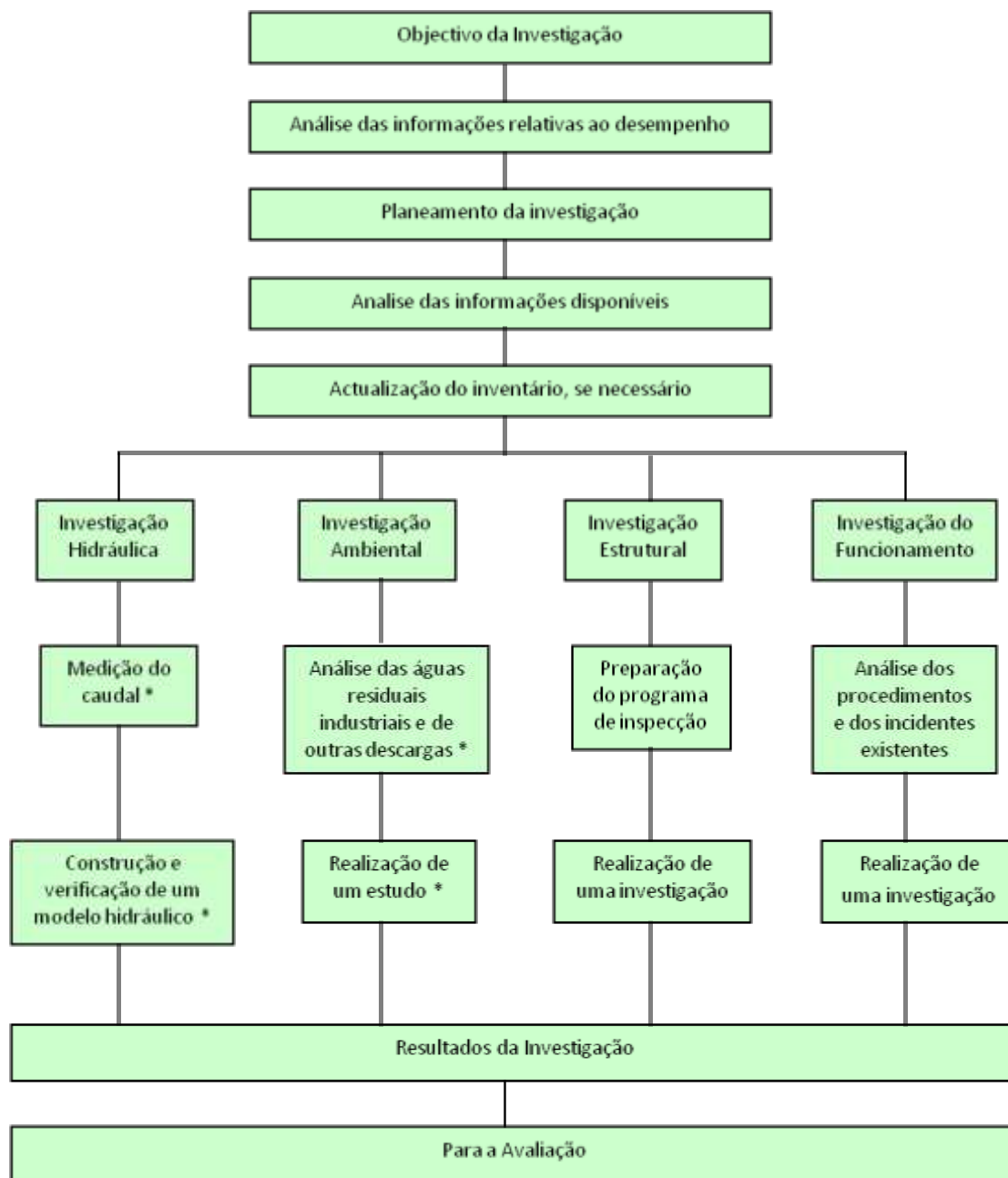


Figura 6.26 – Processo para a determinação dos requisitos de desempenho (adaptada de NP EN752:2009).

No entanto para atingir os requisitos de desempenho é necessário efectuar numa primeira fase todo o desenvolvimento de um processo de investigação em várias áreas e respectiva monitorização e coordenação para um objectivo último comum, resultante da investigação e respectiva avaliação que irá contribuir para a identificação das causas de deficiência e elaboração de um plano de acção eficiente e sua implementação.



* Outros tipos de investigação são também possíveis

Figura 6.27 – Processo de investigação (adaptada de NP EN752:2009).

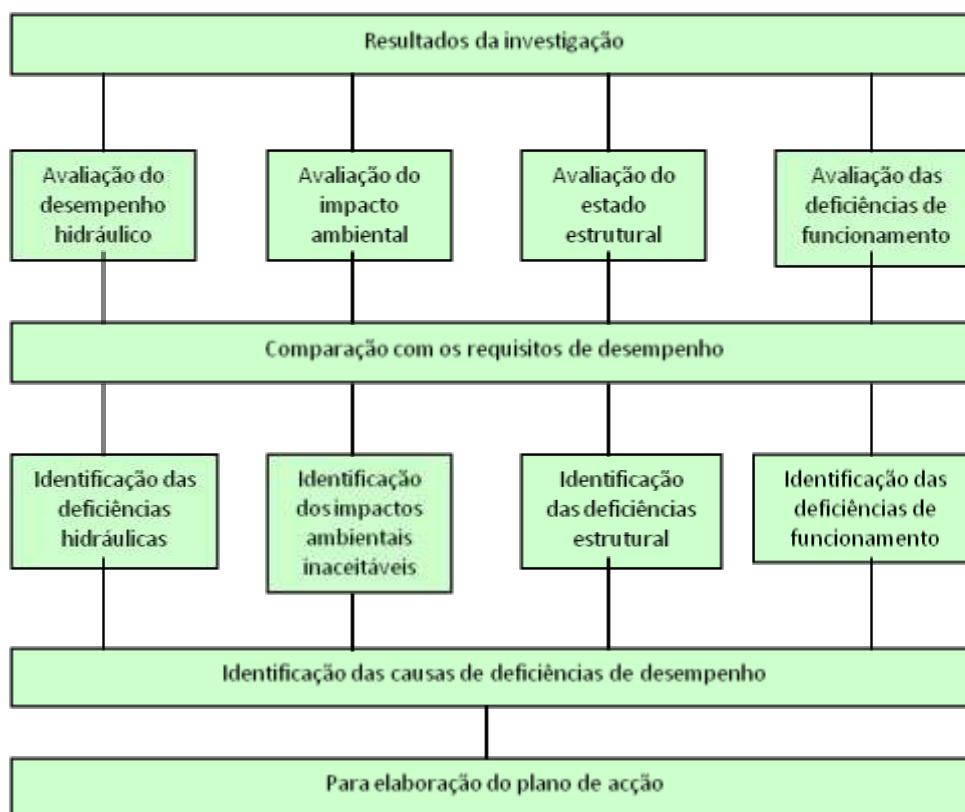


Figura 6.28 – Processo de avaliação (adaptada de NP EN752:2009).

A fase seguinte consiste na elaboração do plano de acções propriamente dito, a partir do resultado da avaliação das várias investigações em diferentes áreas para a mesma finalidade.

A fase final refere-se à implementação no terreno do plano proposto. Este aspecto, embora se resuma em poucas palavras, é sem dúvida, um dos mais decisivos para o sucesso do objectivo. Os intervenientes devem ser profundamente conhecedores dos aspectos práticos e devem também, participar na fase de planeamento para que o mesmo seja exequível e realista e atenda aos meios e recursos disponíveis.

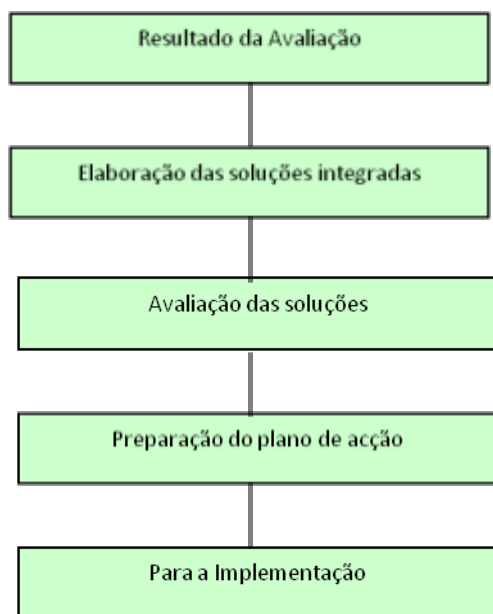


Figura 6.29 – Processo de elaboração do plano de acção (adaptada de NP EN752:2009).

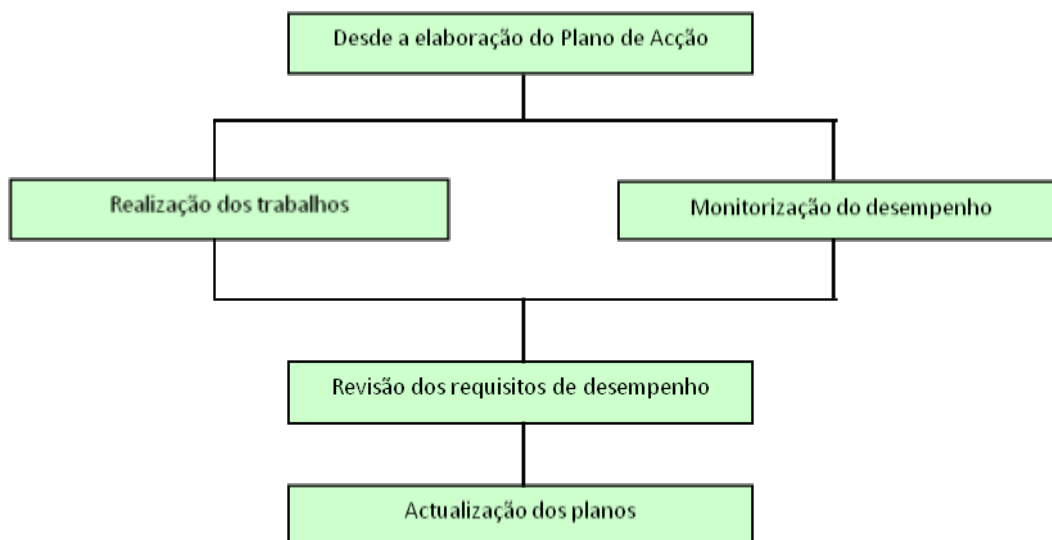


Figura 6.30 – Processo de implementação do plano de acção (adaptada de NP EN752:2009).

No contexto da elaboração do plano de acção, após a avaliação dos sistemas, a norma supracitada refere diversas intervenções possíveis, nomeadamente a nível hidráulico, ambiental e estrutural.

A modelação e a gestão em tempo real devem ser igualmente consideradas ao promover a gestão avançada dos sistemas de gestão da água em meio urbano. Refira-se que a concretização de algumas soluções referidas, bem como a implementação de um sistema de gestão em tempo real, incluindo a modelação dos sistemas, constitui um processo demorado, cujo desenvolvimento tem levado entre 10 a 20 anos nos países da Europa que já dispõem deste tipo de tecnologias.

Na Figura 6.30 apresenta-se um exemplo de um plano de acção de poluição ou ameaça de poluição das águas subterrâneas.

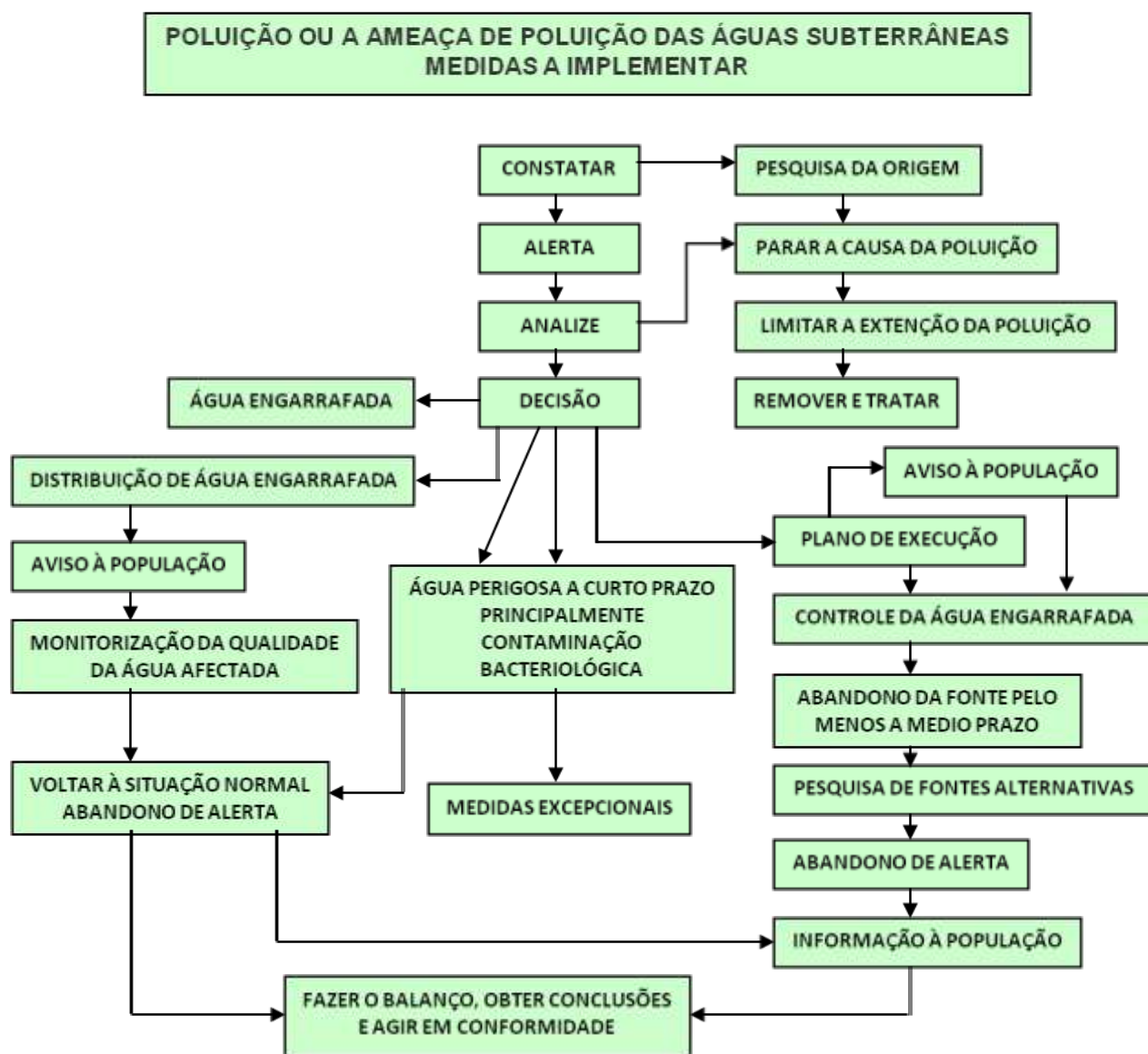


Figura 6.31 – Fluxograma da metodologia de implementação de um plano de acção de poluição ou ameaça de poluição das águas subterrâneas (Fonte: adaptado de A. Lallemand-Barrés, J.C. Roux, 1989).

Uso do solo e recarga de aquíferos

O rebaixamento do nível piezométrico devido a situações de sobre-exploração dos aquíferos é uma realidade preocupante em muitos países, nomeadamente naqueles em que esse rebaixamento favorece fenómenos de intrusão salina, quando próximos da linha da costa. Assim, entre outras a reutilização de águas residuais para recarga de aquíferos é uma hipótese bastante considerada, uma vez que se completa a alimentação natural do aquífero, diminuindo o teor em sais e melhorando a fertilidade dos solos. A recarga pode acontecer de forma directa ou indirecta. A recarga directa faz-se através de sistemas de infiltração no terreno ou injeção em poços. A recarga indirecta está geralmente associada à rega agrícola. Em qualquer dos casos, os principais parâmetros a ter em atenção são os sólidos suspensos (devido a fenómenos de colmatção de canalículos), cargas bacteriológicas e elementos tóxicos (risco de contaminação de aquíferos).

Na Tabela 6.10 apresentam-se várias contribuições oferecidas pelas diversas técnicas, no sentido da requalificação do tecido urbano e da melhoria do bem-estar das populações.

Tabela 6.10 - Usos múltiplos oferecidos pelas soluções de controlo na origem
(adaptado de AZZOUT *et al.*, 1994).

Técnicas	Contribuição	
	Recarga de aquíferos e/ou rega	Paisagística
Trincheira de infiltração	Contribuição para o equilíbrio do ecossistema	Agradável paisagística - mente *
Trincheira de retenção	Não	Agradável paisagística - mente *
Pavimentos de infiltração com estrutura reservatório	Contribuição para o equilíbrio do ecossistema	Não
Pavimento de retenção com estrutura reservatório	Não	Não
Bacia de infiltração	Contribuição para o equilíbrio do ecossistema	Zona de lazer e recreio
Bacia de retenção seca	Não	Zona de passeio
Bacia de detenção de nível permanente	Contribuição para o equilíbrio do ecossistema	
Bacia enterrada de infiltração	Contribuição para o equilíbrio do ecossistema	Não

* Para técnicas com cobertos vegetais

As soluções de controlo na origem englobam estruturas de infiltração e retenção, divididas essencialmente por dois grandes grupos, em função da respectiva localização: à superfície, incluindo pavimentos porosos ou com estrutura reservatório e bacias de infiltração e/ou retenção; ou sub-superficiais, nomeadamente trincheiras de infiltração. A aplicação destas tecnologias pode ser complementada com pequenos dispositivos de pré-tratamento (e.g., remoção de sedimentos e óleos e gorduras), caso tal seja recomendado, sendo igualmente usual a utilização conjunta de diferentes tipos de estruturas.

As soluções de controlo na origem, pelas características que apresentam, são compatíveis com a evolução das infra-estruturas, em termos de desenvolvimento sustentado, pois permitem, em regra, economias globais significativas, em relação às soluções convencionais de drenagem enterrada, em termos de recursos económicos e materiais.

CAPÍTULO - 7

CONCLUSÕES

O principal objectivo deste trabalho consiste na compatibilização e escolha de uma metodologia a adoptar para a delimitação de perímetros de protecção de captações de água para abastecimento público em aquífero poroso. Este objectivo foi alcançado como se demonstra ao longo de todo o desenvolvimento do estudo apresentado, em especial no ponto 8 do capítulo 6 em que é efectuada a delimitação concreta do perímetro de protecção da captação FR1. Esta determinação serve de exemplo genérico da metodologia a adoptar à generalidade das cerca de 60 captações existentes na região.

Com este trabalho também se procurou efectuar a sistematização dos procedimentos de delimitação dos perímetros de protecção, devido essencialmente a necessidades gestionárias de recorrer ao processamento automático de dados. Ao longo deste trabalho foi iniciado esse processo de sistematização de informação, no entanto seria necessário que esse trabalho tivesse continuidade a fim de dar o mesmo tratamento à totalidade das captações. Este procedimento deverá ser devidamente acompanhado, para que se efectue as adaptações necessárias a cada caso específico evitando a acumulação de erros pela repetição aleatória de procedimentos. E tal como na generalidade, o benefício da tecnologia varia de acordo com a boa ou má utilização que dela é feito.

Um outro aspecto importante, prende-se com o desenvolvimento de um programa informático que permita a avaliação automática do comportamento do aquífero às varias solicitações. Para atingir esse fim será necessário recolher e fornecer à aplicação informática os dados de todas as captações referidas, à semelhança da metodologia seguida para a captação FR1. Apenas quando toda essa base de dado se encontrar completa será possível através de meios automáticos, (nomeadamente a telegestão que neste momento já se encontra ligada em tempo útil às captações), fornecer informação em tempo real sobre o comportamento geral do aquífero. Trata-se de um elevado numero de dados que implica um super compilador bastante dispendioso, cujo investimento não é valorizado, em virtude de não ser visível o seu retorno efectivo.

A compatibilização geral dos limites de recarga e exploração seria a finalidade última de todo o funcionamento desta aplicação, no entanto e com fundamento na metodologia proposta ao longo do trabalho e face à legislação em vigor, seria necessário impor um limite de caudal de exploração de água muito específico para cada captação, de acordo com as suas características próprias como é demonstrado através da metodologia apresentada, no nº.8 do capítulo 6. O caudal de exploração inicialmente adoptado de 892,8m³/dia, passa por aplicação da metodologia proposta e para dar cumprimento à legislação em vigor para 553 m³/dia que corresponde a cerca de 7h de extracção diária.

A organização e sistematização das etapas iniciadas com a metodologia de monitorização das captações uma a uma, já se encontra actualmente a ser realizada pelas entidades gestoras. O próximo passo, que irá alterar completamente o modo como é encarada e como é feita actualmente a gestão do recurso de que falamos, consiste na monitorização integrada do aquífero. Este passo só será possível quando for efectuada a centralização de toda a base de dados em super computador, a fim de possibilitar a adopção de uma metodologia ou plano de acção do tipo do representado através do fluxograma da figura 6.30, apresentado no ponto 11 do capítulo 6. Este plano de acção deverá aplicar-se tanto para a sistematização de tomadas de decisão que se relacionam com acção preventiva quer com acção correctiva dos acontecimentos que se relacionem directamente com a qualidade e quantidade de água para abastecimento às populações. Geralmente estes dois aspectos encontram-se muito directamente relacionados, uma vez que a redução de caudal por sobreexploração do aquífero, em regra implica a degradação da qualidade da água captada.

Por fim, a estruturação de um sistema SIG, acessível na internet que ligue todos os utilizadores ou entidades gestoras, pode ser uma realidade. Já existem diversas versões no mercado, algumas delas em experimentação em várias instituições, que podem ser adaptadas às necessidades e diversidade dos utilizadores. Sendo este, um trabalho moroso e de grande envergadura, no entanto e mais uma vez trata-se de uma questão de visão de futuro ou de definição de prioridades, ou mesmo de opção gestonária. Ou seja tudo depende da importância que as populações dão à água, qual o nível prioritário que ela tem nas nossas vidas, ou qual a necessidade ou escassez que temos deste recurso.

CAPÍTULO - 8

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A recuperação de aquíferos contaminados é uma tarefa muito complexa, visto que o processo de renovação das águas é lento, a velocidade de fluxo é extremamente reduzida, além dos elevados custos de reabilitação. Os aquíferos sujeitos a impactos consideráveis podem levar, em certos casos, centenas de anos para recuperarem a sua qualidade natural.

É de salientar que as acções preventivas são as mais indicadas para uma gestão sustentável dos recursos hídricos, com o mais baixo custo para a sociedade, evitando que os poluentes de diversas origens atinjam as principais fontes de abastecimento de água.

A delimitação de perímetros de protecção tem sido até ao momento o modo mais eficaz de efectuar essa prevenção, uma vez que tem por base a implementação de sistemas de alerta para os diferentes níveis de proximidade da captação de acordo com o grau de risco associado. Partindo do princípio que determinada substância ou processo gerador de poluição não se encontra ainda dentro da zona a proteger, o sistema de alerta deverá detectar com a antecedência mínima necessário o poluente, para que sejam tomadas as medidas necessárias para que este não atinjam a captação, ou seja o sistema de alerta deverá ser accionado com a antecedência suficiente para evitar um problemas de saúde pública. Deste modo não basta apenas definir uma área de interdição a determinados usos, é necessário dotar estas áreas de processos de monitorização para detecção de poluentes que possam eventualmente ser transportados na corrente de fluxo subterrânea. Devendo numa primeira fase ser implementada a detecção de substâncias de acordo com a sua perigosidade e frequência na zona considerada, o que implica um estudo aprofundado e um vasto conhecimento sobre a composição química resultante das actividades locais e quais as consequências na saúde pública, da entrada dessas substancias na cadeia alimentar.

Deve-se sempre ter em consideração que, onde existir água subterrânea, esta está de algum modo sob risco de ser afectada pelas acções humanas. Mesmo que existam solos

ou rochas complementares impermeáveis, como é o caso do local onde se localiza a captação em estudo, não se pode evitar completamente a contaminação.

Cabe ainda ressaltar que o uso dos mananciais subterrâneos em larga escala requer uma gestão adequada dos aquíferos a nível regional. O que inclui o conhecimento dos volumes de recarga e descarga nas bacias hidrográficas, necessidades futuras de extracção, usos múltiplos de água e o conhecimento das questões relativas à qualidade da água derivada de fontes de contaminação diversas, abrangendo a recarga artificial e a intrusão marinha (Hoppenstedt, 1998).

Na generalidade os autores que apresentam os aspectos metodológicos para a delimitação do perímetro de protecção dão maior destaque aos métodos analíticos e aos métodos numéricos, direccionados genericamente para captações verticais totalmente penetrantes e com caudais bombeados na própria captação.

Os métodos disponíveis variam em termos de complexidade do conhecimento de alguns parâmetros hidrogeológicos, nomeadamente, a transmissividade, a porosidade, o gradiente hidráulico, a condutividade hidráulica, o caudal de extracção e a espessura saturada do aquífero. Em Lobo Ferreira *et al.* (2006) são apresentados os critérios de selecção das metodologias para a protecção e zonamento dos recursos hídricos, propondo organigramas de decisão para a selecção dos diferentes métodos em função dos objectivos e dos dados necessários à sua aplicação (ver Cap.5.3, Figura 5.27).

Os métodos mais desenvolvidos, sofisticados, à partida teoricamente mais adequados, usam equações de fluxo utilizadas nos modelos analíticos e numéricos assumindo que: o aquífero é isotópico nas suas características; o fluxo da água subterrânea é geralmente bidimensional; e a direcção do fluxo é previsível relativamente à distribuição das cotas piezométricas. No presente trabalho considera-se que nenhum dos métodos expostos pelos diferentes autores, por si só se entende ser completamente adequado à presente situação, dado o facto de cada método possuir as suas próprias limitações. Assim os métodos utilizados neste trabalho, apresentados no Capítulo 6.8 “Definição dos perímetros de protecção” baseiam-se em informação recolhida no local, permitindo assim uma definição mais adequada do perímetro de protecção da zona em estudo à realidade.

No caso presente da captação em estudo, a possibilidade de contaminação da mesma por infiltração vertical é um risco de certo modo menor devido a espessura da camada de argila que confina o aquífero e que varia entre os 20 e os 40m. No entanto poderá provir variados tipos de contaminação da zona de recarga que se encontra a poucos quilómetros da captação mas já fora do perímetro de protecção da mesma, mais precisamente na zona da arriba fóssil da Costa da Caparica, já referida no capítulo anterior, devido à sua importância geológica e vulnerabilidade. E na zona da Aroeira, com as suas actividades específicas nomeadamente ao nível de extensos campos de golfe.

Uma vez que não é possível interditar todas as actividades, ou dificilmente se encontrariam actividades completamente compatíveis com a perfeita preservação do aquífero, é necessário no mínimo que dentro das áreas previstas na legislação, que o sistema seja dotado de um método anti-contaminantes para detecção e erradicação de substâncias indesejáveis na água de consumo.

No caso de haver arrastamento de contaminantes pelas águas da chuva e de escorrência e em especial as cheias recorrentes que se verificam sazonalmente na baixa de Corroios por transbordo do leito da vala, constitui um risco de contaminação das captações limítrofes, afectando mais directamente a vulnerabilidade do perímetro de protecção imediato das captações locais. Neste caso a protecção sanitária imediata e de prevenção é essencial, estando também prevista na legislação nacional, no entanto não devidamente regulamentada, nomeadamente quanto à pormenorização de aspectos construtivos da protecção da cabeça do furo, que pode revestir imensas variantes de acordo com a natureza do aquífero, o tipo de solo local, cota topográfica entre outros aspectos que podem ser limitadores, de acordo com a geografia e os riscos do local de implantação da captação.

BIBLIOGRAFIA

ALBINET, M. (1972) Contribution à la délimitation des périmètres de protection des captages d'eau souterraine. Essai de détermination de l'aire d'alimentation de captages en nappes libres. Note technique n° 3, BRGM 72. SGN 370. AME.

ALLER, L.; BENNET, T. ; LEHR, J.H. e PETTY, R.J. (1987) DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. Environmental Protection Agency Report 600/2-87-035. Washington, D.C.

ALMEIDA, C.; MENDONÇA, J.J.L.; JESUS, M.R.; GOMES, A.J. - Sistemas Aquíferos de Portugal Continental. Instituto da Água. 2000, 661 pp.

ALMEIDA, C.; BIONDIC, B.; HERTELENDI, E.; HINIC, V.; MORELL, I. (1989) - Pollutants and Pollutant Transport in Karst Areas, in Hydrogeological Aspects of groundwater protection in karstic areas. COST Action 65, Final Report, EUR 16547 EN, p.371-375.

AZZOUT, Y.; BARRAUD, S. ; CRES, F.N. ; ALFAKIH, E. (1994) - Techniques alternatives en assainissement pluvial. Choix, conception, réalisation et entretien, Lavoisier-Tec. et Doc. ed., Paris, 372pp.

BAYÓ DALMAU, A.; CASTIELLA MURUZABAL, J.; CUSTODIO GIMENA, E.; NIÑEROLA PLA, S. Y; VIRGOS SORIANO, L. – Ensayo sobre las diversas tipologías de acuíferos en rocas carbonatadas de España. Infiltración, técnicas de estudio y formas de captación y explotación. En: I Máster en Tecnologías Hidrogeológicas. IGME –ETSIMM. Madrid, 1991.

BEAR, J. - Hydraulics of Groundwater, McGraw-Hill (1979), 567 p. 1979. Also re-published by Dover Publications, 2007.

BOILLOT, G.; RECQ, M.; WINTERER, E.; MEYER, A. W.; APPELEGATE, J.; BALTUCK, M.; BERGEN, J. A.; COMAS, M. C.; DAVIES, T. A.; DUNHAM, K.; EVANS, C. A.; GIRARDEAU, J.; GOLDBERG, D. G.; HAGGERTY, J.; JANSÁ, L.F.; JOHNSON, J. A.; KASAHARA, J.; LOREAU, J.P.; LUNA-SIERRA, E.; MOULLADE, M.; OGG, J.; SARTI, M.; THUROW, J. AND WILLIAMSON, M. A. - Tectonic denudation of the upper mantle along passive margins: a model based on drilling results (ODP Leg 103, western Galicia margin, Spain).

CALDEIRA CABRAL, F. – Projecto Apoio ao Plano Almada Ciclável, Centro de Estudos de Arquitectura Paisagista, Câmara Municipal Almada, 2004.

CASCALHO, J. (2000) Mineralogia dos Sedimentos Arenosos da Margem Continental Setentrional Portuguesa. Dissertação apresentada à Universidade de Lisboa para obtenção do grau de doutor em Sedimentologia. Universidade de Lisboa.

CIABATTI, P. e LOBO-FERREIRA, J.P.(1994) – Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal. Análise da legislação sobre zoneamento de protecção de captações de águas subterrâneas. Aplicação a dois casos de estudo portugueses, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 247/94 – GIAS, Lisboa.

CIVITA, M. (1990) – La valutazione della vulnerabilità degli acquiferi. Proc. 1° Nat. Cong. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi, 3, Marano sul Panaro.

CONDESSO DE MELO, M.T.; MARQUES DA SILVA, M. A.; CABANO, G. A. (2004) - Study of the salinisation processes affecting the baseline groundwater quality in the Aveiro Quaternary coastal aquifer (Portugal). Article. Proceedings 18th Salt Water Intrusion Meeting. Cartagena (Spain), 31 May-3 June.

CRUZ, J.V. (1997) – Estudo hidrogeológico da Ilha do Pico (Açores - Portugal). Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Geologia, Universidade dos Açores, 2 vol., Ponta Delgada.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. – Hidrologia Subterrânea. Ediciones Omega, 2 tomos. Barcelona, 1983.

FEITOSA, F.A.C. AND MANOEL F.J. – Hidrogeologia: – Conceitos e Aplicações , CPRM, Fortaleza, 1997.

FERREIRA GOMES (2001) - Revista Engineering Geology - Protection Areas of the São Pedro do Sul Spa”, Portugal - Vol. 60.

FERREIRA GOMES (2002) - 6º Congresso da Água - Contribuição para o conhecimento do modelo geohidráulico da água mineral das termas de Carvalhal, Castro Daire (paper 105) – Porto.

FERREIRA GOMES (2006) - 8º Congresso da Água - Estudos Hidrogeoambientais com objectivo a uma nova unidade termal em Santa Comba Dão - Figueira da Foz.

FESEKER, T. e LOBO-FERREIRA, J.P. (2001) – Delineation of Wellhead Protection Zones – A Simplified Approach, in COASTIN A Coastal Policy Research, New Delhi. Newsletter, Number 5, Sep. (disponível em <http://www.teriin.org/teri-wr/coastin/newslett/coastin5.pdf>)

FOSTER, S.S.D. - GOD – Groundwater occurrence, Overall aquifer class e DRASTIC – aquifer Depth, Recharge rate, Aquifer lithology, Soil type, Topography, Impact, aquifer hydraulic Conductivity. Published by IWA Publishing, London, UK, 1987.

FOSTER, S.S.D. (1987) Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy, in W. van Duijvanbooden 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, TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands.

FOSTER, S.S.D. (1991) Unsustainable development and irrational exploitation of groundwater resources in developing nations. An overview. Actas del Congreso Internacional sobre Sobreexplotación de acuíferos: Puerto de la Cruz, España: IAH.

HOFMANN, W. e LILLICH, W. (1973) – Problematik der Bemessung der Engeren Schutzzones fur Lockergesteinsaquifere. Z. Deutsch, Geol. Gesellschaft Band 124, 1 Abb Hannover.

HOPPENSTEDT – Bilanzdaten: Deutsche Bilanzen. Darmstadt: Verlag Hoppenstedt GmbH, 1998.

KÄSS W. – Tracing Technique in Geohydrology, Balkema, Rotterdam, 1998.

KRIJGSMAN, B.; LOBO-FERREIRA, J.P. (2001) - A Methodology for Delineating Wellhead Protection Areas. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Informação Científica de Hidráulica INCH 7, Nov.

KULLBERG, J.C. (2000)– Evolução tectónica mesozóica da Bacia Lusitânia. Dissertação apresentada à Universidade Nova Lisboa para obtenção do grau de doutor em Geologia Aplicada. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

LALLEMAND, A.; J. C. ROUX – Guide méthodologique D'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée a la consommation humaine. Manuels et Méthodes, Editions du BRGM. 1989, 221 p.

LÓPEZ-GETA, J.A; NAVARRETE, P.; MARTÍNEZ, C. & MORENO, L. – Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas. Madrid. ITGE, 1991.

LOBO-FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, M. MENDES e CIABATTI, P.C. – Desenvolvimento de um Inventário da Águas Subterrâneas de Portugal. Volume 1. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1995. (cf. <http://www-dh.lnec.pt/gias/estudos/inventE.html>).

LOBO FERREIRA, J.P.C.; MOINANTE, M.J.; OLIVEIRA, M.M.; LEITÃO, T.E.; NOVO, M.E.; MOREIRA, P.; HENRIQUES, M.J.– Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Sado. 1ª Fase. Caracterização dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Área Abrangida pelo Plano da bacia Hidrográfica do Rio Sado. Anexo Temático 4 – Recursos Hídricos Subterrâneos. Relatório LNEC-GIAS, Novembro de 1999.

LOBO FERREIRA, J. P. (1999) Inventariando, Monitorizando e Gerindo de Forma Sustentável Recursos Hídricos Subterrâneos. A Situação Portuguesa, os Desafios da União Europeia e a Globalização. Lisboa, LNEC, Programa de Investigação apresentado a concurso para acesso à categoria de Investigador-Coordenador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (Programa publicado pelo LNEC na Série Teses e Programas de Investigação, Nº 14, 2000).

LOBO-FERREIRA, J.P.; MOINANTE, M.J.; DIAMANTINO, C.; HENRIQUES, M.J.; OLIVEIRA, M.M. (2005) Regional surface water protection and zoning: application to the Zhangji case study area, in MANPORIVERS International Workshop on Management Policies and Control Measures. Yixing, Jiangsu Province, P.R. China, 19-21 November.

LOPO DE MENDONÇA, J.; CABRAL, J. (2003) - Identificação de falhas na Bacia Cenozóica do Tejo através de técnicas de investigação hidrogeológica. Comun. Inst. Geol. e Mineiro, t. 90, pp. 91-102.

LOPO MENDONÇA, J.; RAMOS, C.; ZÊZERE, J.L.; REIS, E. – Reserva Ecológica Nacional do Oeste e Vale do Tejo, Quadro de Referência Regional Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo, Lisboa 2009.

MARQUES, J. M. & PEDROSA, M. Y. – Mina de Jales: Uma abordagem da hidrogeologia ambiental. Geólogos - Departamento de Geologia/Centro de Geologia da Universidade do Porto. F. C. U. P., 1999.

MOINANTE, M.J. de A. (2003) Delimitação de Perímetros de Protecção de Captações de Águas Subterrâneas Estudo Comparativo Utilizando Métodos Analíticos e Numéricos. Tese de Mestrado apresentada à Universidade Técnica de Lisboa, com parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Georrecursos Lisboa/Portugal.

MOINANTE, M.J., LOBO FERREIRA, J.P.C. – Delimitação de Perímetros de Protecção de Captações de Águas Subterrâneas Destinadas ao Abastecimento Público do Concelho de Montemor-o-Novo. In: Cabral, J.J.S.P., et al. Águas Subterrâneas: Aquíferos Costeiros e Aluviões, Vulnerabilidade Aproveitamento. Tópicos Especiais em recursos Hídricos, 2004.

MOREAU Y P.MORFAUX – Hidrogeología del Campo de Nijar y Acuíferos Almeria. 1989.

NAVARRETE, C.M; GARCÍA, A.G. – Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio. Serie: HIDROGEOLOGÍA Y AGUAS SUBTERRÁNEAS. IGME. Madrid, 2003.

NOBRE, M.M.M.; NOBRE, R.C.M., DANTAS, J.A. (1998) - Utilização de Técnicas não Convencionais na Remediação de Solos e Águas Subterrâneas Subjacentes a um Pólo Industrial. In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos. ABMS/ABGE. Brasília. Novembro.

OLIVEIRA, M.M. (2009) – Aspectos Quantitativos dos sistemas aquíferos do Baixo Tejo. Seminário sobre os sistemas aquíferos da Bacia do Baixo Tejo. Novembro.

PACHECO, A. et al. Comenteries – A Potential Risk To Graundwater. Water Science and Technology - Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1991.

REBOUÇAS, A.C. – Águas Subterrâneas no Novo Modelo do saneamento Básico. Instituto de Estudos Avançados – USP. Hidro Ambiente Projectos, Consultadoria e Serviços Ltda, 1996.

RIBEIRO, A.; LAUTENSACH, H. & DAVEAU, S. - Geografia de Portugal. IL O Ritmo Climático e a Paisagem, pp. 623. Edições João Sá da Costa – Lisboa, 1987. pp 623.

SAUTY, J.P.; GRINGARTEN, A.C.; FABRIS, H. (1982) – Sensible Energy-Storage In Aquifers .2. Field Experiments And Comparison With Theoretical Results, Water Resource Res.

SIMÕES, M.M. (1998) Contribuição para o conhecimento hidrogeológico do Cenozóico da Bacia do Baixo Tejo. Dissertação apresentada à Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de doutor em Geologia Aplicada. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, V.I, 270 p.

TRAC, N.Q. (1980) – Étude des eaux souterraines de la péninsule de Setúbal (Système aquífère moi-pliocène du Tejo et du Sado) – PNUD/POR/77/015, 1980.

WEAKENINGH (1985) - Buffer Strips Water Supply Reservoirs – A Model and recommendations. American Water Resources Association, December.

e-GEO - Sistema Nacional de Informação Geocientífica/INETI

EPA - Environmental Protection Agency, 1987.

EPA - Environmental Protection Agency, WHPP, 1994.

EPAL - Empresa Pública de Águas de Livres, 1996.

EPPNA – Equipa de Projecto do Plano Nacional da Água - INAG, 1998.

HIDRA - Plano Geral de Drenagem de Águas Residuais do Concelho de Almada, 2009.

HP – Síntese do Estudo de caracterização dos Aquíferos e dos Consumos de Água na Península de Setúbal, 1991.

INAG – Instituto da Água - Definição, Caracterização e Cartografia dos Sistemas Aquíferos de Portugal Continental. Lisboa, Instituto da Água, Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos, Divisão de Recursos Subterrâneos, 1997. INAG - <http://intersigweb.inag.pt/InterSIG/>, 2000.

IS - Susceptibility Index – INAG, 1998.

ITGE - Instituto Tecnológico GeoMineiro de Espanha, 1991.

ITGE – Guia Metodológica para la Elaboración de Perímetros de Protección de Capataciones de Aguas Subterráneas. Madrid, Instituto Tecnológico GeoMineiro de España, Dezembro, 1991.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil (2008) Planeamento e Gestão do Uso do Solo Agrícola Atendendo à Vulnerabilidade dos Aquíferos à Poluição Difusa. Anfiteatro Centro de Congressos do LNEC, Lisboa 11 de Dezembro.

MINISTÉRIO DO AMBIENTE – IA– Plano da Bacia Hidrográfica do Tejo – 1ª.Fase – Volume III - Análise, 1999.

Plano de Ordenamento e Gestão da Paisagem Protegida da Arriba Fóssil da Costa da Caparica, Lagoa de Albufeira e Áreas Adjacentes, 2007.

SMAS Almada www.smasalmada.pt

SNIRH - Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos

SINTACS – Soggiacenza, Infiltrazione, Non saturo, Tipologia della copertura, Acquifero, Conducibilità, Superficie topografica

SMAS Almada www.smasalmada.pt

USEPA – Agência Ambiental Norte Americana.

VAN STMPVOORT- AVI – Aquifer Vulnerability Index, 1992.