

CAPÍTULO 7

SÍNTESE E CONCLUSÕES

7 SÍNTESE E CONCLUSÕES

7.1 Síntese conclusiva

A tese de Doutoramento apresentada neste documento, enquadrada no âmbito do estudo desenvolvido para o Projecto Comunitário Gabardine “*Groundwater Artificial Recharge Based on Alternative Sources of Water: Advanced Integrated Technologies and Management*”, do 6º Programa-Quadro de Investigação, Desenvolvimento Tecnológico e Demonstração, e subordinada ao tema da recarga artificial de aquíferos, pretendeu determinar de que forma este tipo de metodologia poderia ser utilizada de forma viável para melhorar da qualidade da água de um sistema aquífero poluído por intensivas práticas agrícolas e declarado como zona vulnerável pela implementação da Directiva dos Nitratos.

A área de estudo seleccionada para a implementação dos ensaios de recarga artificial foi o sistema aquífero da Campina de Faro, localizado na região Algarvia. Um dos principais objectivos deste estudo, enquadrado na componente Portuguesa do Projecto Gabardine, consistiu na optimização da reabilitação do aquífero superficial da Campina de Faro, visando a aplicação *in situ* de diferentes metodologias de recarga artificial do aquífero e o recurso a fontes de água alternativas, com o objectivo de minimizar os efeitos causados pela poluição difusa. As motivações de base para a realização deste estudo estiveram relacionadas com a contribuição científica para o cumprimento de objectivos ambientais, nomeadamente com “o bom estado de qualidade” referido pela Directiva-Quadro da Água, que deverá ser atingido até 2015.

No Capítulo 2 realizou-se uma revisão do estado da arte sobre a recarga artificial de aquíferos e das metodologias que podem ser utilizadas para este fim. A recarga artificial permite o armazenamento no meio subterrâneo de excedentes hídricos, em períodos de maior disponibilidade, para utilização futura, em períodos de menor disponibilidade. O objectivo é aproveitar a capacidade natural que os aquíferos possuem para armazenar

água, aumentando, por um lado, a disponibilidade da água subterrânea, e/ou melhorando a sua qualidade, no caso de um aquífero afectada por um determinado tipo de poluição antropogénica, como seja a poluição difusa, ou natural, como a intrusão salina em aquíferos costeiros.

A execução deste tipo de metodologia com o objectivo de armazenar água no meio subterrâneo encontra-se muito difundida em vários países, especialmente em zonas áridas e semi-áridas, onde os problemas de escassez de água se fazem sentir de forma mais pronunciada. Em Portugal a aplicação prática deste tipo de metodologia dá agora os primeiros passos, como consequência directa do desenvolvimento de dois Projectos Comunitários: (1) Projecto Gabardine; (2) Projecto ASEM WATERnet - "*Multi-Stakeholder Platform for ASEM S&T Cooperation on Sustainable Water Use*", também do 6º Programa-Quadro, ambos desenvolvidos no LNEC e em cooperação com um conjunto de prestigiadas instituições estrangeiras.

Existe uma grande variedade de métodos de recarga artificial de aquíferos que têm sido aplicados e experimentados em diversos locais do mundo. As metodologias utilizadas dependem se a recarga é directa, por infiltração no solo através de bacias de infiltração ou de outro tipo de estruturas (mais adequadas no caso de aquífero freáticos) ou se é indirecta, por intermédio de furos que atingem o aquífero a recarregar (mais adequadas no caso de aquíferos confinados, mais profundos). As taxas de infiltração para solos de textura fina aproximam-se de 0,08 m/dia, para solos margosos de 0,27 m/dia, para areias limpas médias de 0,82 m/dia e para areias grosseiras limpas de 1,37/dia (Bouwer, 2002). As taxas da evaporação da água em superfícies abertas são aproximadamente de 0,4 m/ano para climas frios e húmidos a 2,4 m/ano para climas quentes e secos. O controlo e manutenção da estrutura de recarga deve efectuar-se de modo a manter as taxas de infiltração e evitar a sua colmatação por materiais finos.

Nos EUA os projectos mais significativos localizam-se em zonas áridas e semi-áridas do Oeste ou em zonas onde o crescimento populacional causou uma perturbação significativa nos recursos hídricos disponíveis. Os métodos de recarga artificial mais comuns são os sistemas de ASR. Na Europa os sistemas de recarga induzida são mais comuns, atingindo percentagens importantes do abastecimento para consumo doméstico.

Os aspectos legislativos sobre o tema e outros temas paralelos, com interesse para o desenvolvimento do estudo foram também abordados no Capítulo 2, dos quais se destacam a Directiva Quadro da Água; a Lei da Água; o Decreto-Lei n.º 226-A/2007 que estabelece o novo regime da utilização dos recursos hídricos; o Decreto-Lei 69/2000 que aprova o regime jurídico da Avaliação de Impacte Ambiental; o Decreto-Lei n.º 97/2008 que aprova o regime económico e financeiro dos recursos hídricos; o Decreto-Lei nº 208/2008 que estabelece o regime de protecção das águas subterrâneas contra a poluição e deterioração; a Directiva dos Nitratos; a Directiva das Águas Subterrâneas (transposta para a Lei das Águas Subterrâneas).

O Capítulo 3 inclui uma caracterização detalhada da área de estudo, em termos de climatologia, geologia e hidrogeologia, características hidráulicas, características hidroquímicas, funcionamento hidráulico, balanço hídrico e vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas. A área de estudo seleccionada fica inserida no sistema aquífero da

Campina de Faro (M12), localizada na sua parte central, com cerca de 10 km². É limitada a Norte por dois sistemas aquíferos (M10 – São João da Venda-Quelfes e M11 - Chão de Cevada-Quinta João de Ourém), a Oeste pela Ribeira de Marchil, a Este a cerca de 2 Km do rio Seco e a Sul pelo estuário da Ria Formosa.

Os dados climatológicos utilizados na análise são provenientes do Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIRH). A precipitação média anual é de 832 mm, 644 mm e 630 mm, relativa às estações climatológicas de São Brás de Alportel, Estói e Quelfes, respectivamente. Naturalmente, a precipitação é mais elevada a Norte, onde a topografia é mais elevada, decrescendo para Sul juntamente com o declive do terreno. A temperatura do ar, de acordo com os registos da estação de São Brás de Alportel, tem um valor médio mensal de 16,7°C. Para a área de estudo contribui o escoamento superficial verificado na parte final da bacia hidrográfica do rio Seco e também uma parte da bacia hidrográfica da ribeira das Lavadeiras. A precipitação anual média na bacia do rio Seco, determinada pelo método dos polígonos de Thiessen foi de 765,0 mm (série de 22 anos, compreendida entre 1980 e 2001).

Em termos estruturais a área de estudo insere-se na bacia sedimentar Algarvia, caracterizada por um monoclinal, inclinado para Sul (Silva, 1984; Manuppella *et al.*, 1987), afectado por uma forte tectonização e compartimentação, com uma sequência de formações sedimentares de idades compreendidas entre o Jurássico e o Miocénico. Na região da Campina de Faro é referida uma estrutura em forma de *graben*, controlada por falhas, que se formou no final do Cretácico (Silva, 1988).

Em termos hidrogeológicos, o sistema da Campina de Faro caracteriza-se por três aquíferos: o aquífero Cretácico, com espessura superior a 1000 m; o aquífero confinado Miocénico, formado pelos calcarenitos e o aquífero livre, formado pelas areias e cascalheiras do Mio-Plio-Quaternário. A espessura das formações carbonatadas do Miocénico é muito variável, podendo ser superior aos 200 m na zona da Campina de Faro; a SW de Carreiros detectaram-se as maiores espessuras. A espessura das formações que constituem o aquífero mais superficial são também muito variáveis, atingindo valores médios de 25 m e máximos de 60 m (Silva, 1988). A separação entre os dois aquíferos mais superficiais é realizada por uma camada confinante, de níveis silto-argilosos. A ausência desta camada, em alguns locais, possibilita a conexão hidráulica entre os dois aquíferos. As formações do Holocénico que afloram na área de estudo são as aluviões, representadas numa extensa área da Campina da Faro, e os terraços fluviais, que surgem nas margens do rio Seco. A sua espessura é normalmente inferior a 10 m.

Na Campina de Faro o principal problema de poluição das águas subterrâneas refere-se às concentrações elevadas de nitratos, detectadas desde o início da década de 90, com origem em fontes poluentes difusas associadas à agricultura. A Zona Vulnerável de Faro (ZVF) foi identificada em 2004, através da aplicação da Directiva dos Nitratos e legislada através da Portaria n.º 833/2005, de 16 de Setembro e da Portaria n.º 1100/2004, de 3 de Setembro, que aprova a lista e as cartas onde se identificam as zonas vulneráveis. A ZVF inclui os sistemas aquíferos poluídos de Almansil-Medronhal (M9); M10; M11 e M12.

Relativamente à análise da evolução do escoamento superficial, o rio Seco é principal rio que atravessa a área, com direcção aproximada NNE-SSW; os restantes cursos de água são rios tributários que apenas têm escoamento superficial quando existem episódios de precipitação significativos. As duas estações hidrométricas existentes no rio Seco são a estação de Coiro da Burra e a estação de Rio Seco. O volume de escoamento total estimado para a primeira estação foi de 98,39 hm³ (série de 22 anos) e o caudal máximo de 71,39 m³/s, e para a segunda estação, foi de 66,96 hm³ (série 10 anos), tendo registado um caudal máximo de 57 m³/s. Os dados para esta análise foram provenientes do SNIRH e da ARH-Algarve. Realizou-se a comparação entre os volumes de escoamento superficial anuais nas duas estações e a respectiva precipitação, registada na estação de Estói. Para o período de análise (1985/86 a 2005/06), os valores do coeficiente de correlação entre a precipitação e o escoamento superficial são elevados, destacando-se a correlação de 96,2%, na estação de Rio Seco, no período entre 1995/96 e 2004/05. Salienta-se o facto de que, quando a precipitação anual não excede os 600 mm, os episódios de escoamento no rio Seco não são relevantes.

Em Lobo Ferreira *et al.* (2006) realizou-se uma análise que permitiu determinar o volume de água disponível no troço do rio Seco compreendido entre as duas estações referidas. A curva de duração do caudal médio diário realizada para o período de um ano, com valores comuns das séries de dados, mostra que a duração do escoamento é muito pequena: média de 74 dias/ano para a estação de Rio Seco e média de 102 dias/ano para a estação de Coiro da Burra. No sentido de se perceber qual a variação do escoamento superficial nas duas bacias que confluem para a estação de Coiro da Burra e estação de Rio Seco, calculou-se a diferença para o escoamento superficial anual e o caudal médio anual. Com excepção do ano de 1999/2000, o escoamento é superior na estação de Rio Seco, indicando um volume de água que se ganha durante o percurso pela secção do rio. Os valores de escoamento superficial médios calculados foram de 4,50 hm³ para Coiro da Burra e 6,70 hm³ para Rio Seco, entre os anos hidrológicos de 1995/96 e 2004/05. Em termos médios, verifica-se um ganho de 2,20 hm³/ano (0,06 m³/s) na secção mais a jusante. No entanto, verificou-se que existe um volume adicional proveniente da bacia da ribeira de Alface que é quantificado na estação do Rio Seco. Assim estimou-se um cenário de redução do escoamento no Rio Seco e os valores foram novamente calculados. Obteve-se, em termos médios, um volume de escoamento de cerca de 0,61 hm³/ano (0,03 m³/s), que se perde por infiltração na secção em análise, entre as duas estações. Este cenário parece estar mais de acordo com o comportamento influente esperado no rio Seco na referida secção. Também a distribuição deste comportamento influente ao longo do troço em análise não é constante. Estimou-se uma infiltração no troço que atravessa o sistema aquífero em cerca de 0,24 hm³/ano (669 m³/d).

Os valores de recarga para o sistema aquífero da Campina de Faro foram actualizados em Lobo-Ferreira *et al.* (2006), com base na aplicação do modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ_MOD (Oliveira, 2004, actualização do modelo numérico original BALSEQ, Lobo-Ferreira, 1981). Apresenta-se um mapa com a distribuição da recarga para a área de estudo: os valores mais baixos registam-se nas formações aluvionares, na ordem dos 5 mm/ano e os valores mais elevados registam-se nos afloramentos das formações arenosas, podendo chegar aos 380 mm/ano.

A caracterização hidrogeoquímica do sistema aquífero da Campina de Faro iniciou-se nos anos oitenta, com diversos estudos e Teses de Doutoramento. Silva e Almeida (1983) referem tratar-se de águas cloretadas cálcicas. Silva (1988) referem já nesta altura concentrações de nitratos e sulfatos elevadas para ambos os aquíferos (superficial e miocénico), associadas a zonas onde é praticada agricultura intensiva de estufa e zonas com pomares de citrinos como resultado do uso excessivo de fertilizantes azotados (estimam uma taxa de não assimilação de nitrato pelas culturas de 18-19%). Silva *et al.* (1986) referem a presença de áreas salinizadas com águas cloretadas cálcicas ou cloretadas sulfatadas-cálcicas, sendo este um fenómeno relativamente recente. Stigter (2005) avalia a contaminação induzida pelas actividades agrícolas e refere a diluição causada pelo aumento da recarga das águas subterrâneas das águas muito contaminadas e mineralizadas do aquífero calcarenítico do Miocénico Superior e do aquífero margoso do Cretácico. Refere contudo que a aplicação de fertilizantes em grandes quantidades se mantém, assim como as extracções praticadas por residentes. Salaria que há duas décadas atrás as concentrações de nitratos e cloretos eram já bastante elevadas em algumas partes da Campina de Faro, mas a contaminação ainda não tinha adquirido um carácter difuso. Actualmente, a contaminação é nitidamente difusa e bem definida (Stigter, 2005).

Com base na informação proveniente da Rede de Monitorização de Quantidade e Qualidade da água subterrânea (disponível no SNIRH), actualizou-se a informação relativamente às variações espaço-temporais da piezometria e da concentração de nitratos para os sistemas aquíferos integrados na ZVF.

Sobre a Rede de Monitorização de Quantidade, a distribuição dos pontos de observação está concentrada numa área muito restrita, no caso do aquífero confinado, e a informação é espacialmente insuficiente no caso do aquífero freático. Os furos do aquífero freático revelam um comportamento muito diferenciado entre si, podendo ser mais ou menos pronunciado o efeito da sazonalidade. Em termos globais, os níveis subiram no ano hidrológico de 1995/96, no qual se registaram os valores máximos de precipitação (1243 mm) no período em análise, e desceram após dois anos consecutivos com valores de precipitação muito baixos (346 mm e 219 mm), nos anos hidrológicos de 2003/04 e 2004/05. A análise correspondente aos furos do aquífero confinado revela igualmente efeitos de sazonalidade muito marcados, sendo agora mais pronunciadas as tendências gerais de evolução das séries já referidas. Neste gráfico é mais evidente a subida gradual dos níveis no final do período húmido dos anos hidrológicos de 2000/01 até 2003/04, coincidente com anos de precipitação moderada, mas também com o encerramento dos furos de abastecimento público na Campina de Faro.

Relativamente às concentrações de NO_3 , no M12 os valores médios variam entre 68 e 253 mg/L, para o aquífero freático e entre 80 e 211 mg/L, para o aquífero confinado. Com base nesta informação, ambos os aquíferos têm concentrações próximas de NO_3 , que variam espacialmente. Os quatro furos onde se detectam concentrações médias abaixo do VP localizam-se nos extremos da zona central da Campina de Faro. Relativamente aos restantes aquíferos da ZVF, as concentrações são normalmente mais baixas e os valores médios variam entre 4 e 102 mg/L. A área mais poluída é a zona Sul da ZVF, localizada no M12, correspondendo aos aquíferos freático do Mio-Plio-Quaternário e confinado do Miocénico.

Relativamente à evolução da concentração de NO_3 , é muito heterogénea entre furos diferentes e no mesmo furo. Se por um lado, em alguns casos, se verificam as concentrações mais elevadas após o período da estação húmida, noutras casos verifica-se a situação oposta. Nalguns poços do aquífero freático, os efeitos de sazonalidade estão bem marcados, e no caso da proximidade de um curso de água, este efeito traduz o seu carácter influente (e.g. rio Seco e ribeira das Gambelas). Demonstrou-se a conexão hidráulica entre as águas superficiais e subterrâneas e o efeito de melhoria da qualidade da água, eventualmente por diluição, observado localmente na água subterrânea, após episódios intensos de escoamento superficial no rio Seco. Esta ocorrência de melhoria da qualidade da água subterrânea, que se conseguiu naturalmente e apesar de localizada, constitui um facto de extrema importância no âmbito do objectivo proposto.

Sobre o aquífero confinado destacam-se alguns furos com oscilações muito pronunciadas. A recarga destas formações é feita de forma indirecta, por circulação profunda de água infiltrada nas formações cretácicas e jurássicas que afloram a Norte, não sendo de esperar uma situação de causa-efeito com a precipitação tão clara. As variações das concentrações de NO_3 , neste caso, podem atribuir-se a vários factores: a) conexão hidráulica criada com o aquífero superior que possibilita a propagação da contaminação ao aquífero confinado, devido à ausência, em alguns locais, da camada confinante entre os dois aquíferos; b) a extracção no aquífero confinado que poderá inverter o gradiente hidráulico; c) conexão hidráulica criada artificialmente no interior dos poços quando se procedeu a construção de furos mais profundos no seu interior que captam o aquífero confinado, sem isolamento das camadas aquíferas. Em termos de distribuição espacial, a zona mais poluída, para o respectivo período de análise, localiza-se na parte central da região da Campina de Faro, situada predominantemente a NW no aquífero freático e a Sul no aquífero confinado.

No Capítulo 4 são tratados os aspectos relacionados com determinados estudos específicos que foram realizados com a finalidade de completar a caracterização geológica, hidrogeológica, hidrogeoquímica e análise do escoamento subterrâneo do sistema aquífero da Campina de Faro. Os estudos de caracterização do aquífero superficial visaram ainda a selecção de locais adequados à implementação de sistemas de recarga artificial de pequena dimensão. A utilização de métodos de prospecção geofísica, prospecção directa e amostragem de solos completaram a caracterização geológica efectuada.

Os métodos de prospecção geofísica aplicados na área de estudo foram as sondagens eléctricas verticais, o método electromagnético, o método de resistividade eléctrica e o Georadar. A utilização de diferentes métodos, para o conhecimento do substrato geológico, relacionou-se com a validação de cada um dos métodos para o caso de estudo em concreto, o que foi realizado através da sua antecipada aplicação *in situ*, antes de se seleccionar a metodologia mais apropriada, não só para a caracterização geológica e hidrogeológica, mas também, como metodologia de análise e detecção espacial e temporal de ensaios de recarga artificial e de traçador, que se vieram a realizar posteriormente.

Uma análise integrada da informação disponível no âmbito de estudos anteriores, por vários autores, e informação nova adquirida no âmbito do Projecto Gabardine,

possibilitou a proposta de uma estrutura geológica, presente na região da Campina de Faro. Esta informação incluiu colunas litológicas de sondagens e de piezómetros e algumas SEVs. O resultado foi o mapeamento da base dos aquíferos que foram modelados no Capítulo 6. Em relação à interpolação da estrutura do aquífero freático identificou-se, além da depressão referida em Silva (1988), a SW de Carreiros, uma outra, localizada mais a S, numa povoação designada de Cerro do Bruxo. Para SW da ribeira das Lavadeiras a profundidade desta camada diminui acentuadamente, até à zona de afloramento das formações miocénicas, que surgem neste local, possivelmente com a ajuda de acidentes estruturais. No caso do aquífero confinado pode referir-se que, à semelhança do modelo proposto por Geirnaert *et al.* (1982), tem-se uma estrutura inclinada para Sul, que aumenta de profundidade de forma mais ou menos constante, seguindo um alinhamento W-E, atingindo-se as maiores profundidade a Oeste da área de estudo (> 250 m); contudo para Sul da isolinha dos 250 m não existe informação sob a forma como esta estrutura termina.

A caracterização hidrogeológica incluiu a classificação textural de amostras de solos e a determinação de parâmetros hidrodinâmicos característicos das formações arenosas que constituem o aquífero freático da Campina de Faro, a partir de amostras de solos. Determinaram-se valores de permeabilidade a partir da análise de curvas granulométricas. Caracterizaram-se parâmetros hidrodinâmicos (peso específico aparente, porosidade total e permeabilidade) em amostras de solo não perturbadas utilizando métodos laboratoriais, como ensaio laboratorial de carga hidráulica constante. Os valores de porosidade das amostras de solos do Areal Gordo analisadas variam entre 0,23 a 0,34, para a formação das areias e cascalheiras, e de 0,33 a 0,39, para a formação das areias amarelas do Miocénico Superior. As velocidades de escoamento determinadas indicaram um valor mais elevado para a formação das areias amarelas do Miocénico, assinaladas como areais médias bem calibradas, com pouca percentagem de sedimentos finos, em oposição às formações de cobertura, mais argilosas e heterogéneas em termos de distribuição textural. Os valores de permeabilidade, determinados pela aplicação das expressões empíricas de Hazen e Burmister para as amostras de solos arenosos de Carreiros e Areal Gordo, são mais baixos para as areias finas argilo-siltosas ($k_B=5-11$ m/d - prof. 5-13 m), e mais elevados para as areias médias, bem calibradas e uniformes ($k_H=4-42$ m/d e $k_B=22-71$ m/d - prof. 8-35 m).

Para caracterizar o estado actual das águas subterrâneas e de superfície na área de estudo foram realizadas quatro campanhas de monitorização sazonal da piezometria e qualidade da água, no final de dois semestres húmidos, em Abril de 2007 e de 2008 e no final de dois semestres secos, em Setembro/Outubro de 2006 e Outubro de 2007, completando-se assim a monitorização de dois ciclos hidrológicos. Foram monitorizados 65 de pontos de água, dos quais 55 são poços, 5 são piezómetros do LNEC e 5 são furos.

A análise da piezometria na área de estudo é uma tarefa complexa e influenciada por factores de difícil controlo, designadamente os caudais de extracção dos poços e furos. A forma mais adequada de determinar um mapa de piezometria do aquífero superficial na área de estudo consiste em realizar a monitorização num conjunto vasto de poços. No entanto, em cerca de metade dos poços monitorizados existe pelo menos um furo no seu interior, que eventualmente estará a captar o aquífero confinado. Nos poços com furo, o

que acontece em termos de piezometria é que se está a medir uma mistura de dois níveis, com consequências também na qualidade da água dos aquíferos intersectados.

Os resultados das campanhas de monitorização de piezometria possibilitaram a análise de variações sazonais dos anos 2007 e 2008. As seguintes conclusões foram retiradas desta análise:

1) No final da estação húmida de 2007 os níveis de água subiram em média 1,98 m (com variação entre 0,35 e 4,47 m) e no final da estação húmida de 2008 os níveis subiram em média 1,24 m (com variação de 0,35 a 2,60 m);

2) No final da estação seca de 2008, comparativamente com o ano anterior, os níveis de água subiram média 0,60 m (60% dos pontos); e desceram nos restantes, em média, 0,33 m. A precipitação ligeiramente mais elevada no final do ano hidrológico 2007/2008 de 617 mm, comparativamente com o ano anterior, de 568 mm, terá contribuído para esta subida. Os níveis mais baixos correspondem ao início do período de monitorização (Out/2006).

Os resultados da piezometria referem-se, de um modo geral, ao nível dinâmico, uma vez que em 36% dos poços monitorizados se realiza a extracção de água. O escoamento subterrâneo na área de estudo é claramente afectado pela extracção realizada nos poços, sendo possível identificar zonas de maior extracção. Nove dos registos correspondem, muito provavelmente, a níveis estáticos, por pertencerem a poços abandonados e/ou inactivos. É nestes locais que se observam os níveis piezométricos mais elevados, indicando um escoamento subterrâneo no aquífero freático de NW-SE. A análise destes mapas também permitiu identificar uma piezometria normalmente mais elevada em poços com furo no seu interior.

A caracterização hidrogeoquímica indicou que a maioria das águas são de natureza sulfatada ou cloretada cálcica (62%) e uma parte mais pequena das amostras corresponde a água de natureza bicarbonatada cálcica (32%). Em termos de concentrações médias dos aniões e catiões maiores as variações sazonais foram pouco significativas. O mesmo não sucedeu em termos de valores máximos, em que, por exemplo, no caso do NO_3 se verificou o valor mais baixo na campanha de Outubro de 2007. Nesta campanha, conforme se referiu anteriormente, verificou-se a existência de níveis mais elevados comparativamente com o ano anterior. Os parâmetros *in situ* também não evidenciam variações sazonais pronunciadas – a condutividade eléctrica das águas tem valores médios da ordem dos 1300 $\mu\text{s}/\text{cm}$, podendo atingir um valor máximo de 2550 $\mu\text{s}/\text{cm}$; o pH tem geralmente valores da ordem de 7 indicando águas neutras.

A análise da evolução das concentrações de NO_3 entre campanhas e das amplitudes de variação sazonal e anual, permitiu averiguar os seguintes aspectos:

1) No final do semestre húmido, entre Outubro/2006 e Abril/2007, verificou-se em 60% dos pontos monitorizados comuns, uma subida da concentração de NO_3 , em média de 22 mg/L e máximo de 88 mg/L. No final do semestre húmido do ano seguinte verificou-se uma melhoria da situação porque houve uma descida da concentração de NO_3 em mais 20% dos pontos, comparativamente com o ano anterior.

2) No final do semestre seco, entre Abril/2007 e Outubro/2007, verificou-se em cerca de 74% dos pontos monitorizados que a concentração de NO_3 desceu em média 27 mg/L; nos restantes pontos (33%) verificou-se uma subida média de 20 mg/L. Esta

descida poderá estar associada, a uma entrada de água para o sistema, por exemplo pelo retorno de água da própria rega.

Relativamente à distribuição espacial da concentração de NO_3 a zona mais poluída localiza-se a SW da área de estudo, junto às povoações de Vale da Amoreira, Garganta, Rio Seco e Areal Gordo, com concentrações máximas da ordem dos 400 mg/L de NO_3 . As zonas menos poluídas, com concentrações entre 0-100 mg/L situam-se em três locais:

1º) A Norte da área, numa zona envolvente do leito do rio Seco, em Carreiros, que coincide com uma ocupação do solo por pomares de citrinos;

2º) Junto ao limite Sul da área, novamente numa zona em torno do rio Seco, que coincide como uma ocupação agrícola por sistemas culturais e parcelares complexos.

3º) A Este da área, numa zona que coincide parcialmente com a área de implantação dos estaleiros do Areal Gordo.

A restante área possui uma gama de variação de 100-200 mg/L e coincide com a ocupação do solo designada de "pomares", "sistemas culturais e parcelares complexos" e "zonas de utilização agrícola fora do perímetro de rega", de acordo com o Mapa *Corine Land Cover*.

Foi ainda analisada a variação sazonal da concentração de NO_3 medida em furos, representativa do aquífero confinado, sem existir uma mistura de água com o aquífero superficial, que é, neste caso, o que se regista nos poços com furo. O que se prevê é que as concentrações em ambos os aquíferos sejam próximas, nos locais onde existe a referida mistura de água, e normalmente, mais elevadas no aquífero superficial.

Avaliou-se ainda a variação da área poluída em três campanhas e para cada classe de NO_3 . A área com concentração <50 mg/L, que se pode declarar como não poluída, teve o valor mais baixo (2,1%) no fim da estação húmida de 2007. Do mesmo modo, também a área poluída com uma concentração >50 mg/L e >100 mg/L foi mais elevada nesta mesma altura, mostrando mais uma vez a influência da sazonalidade no arraste do azoto existe no solo. Nota-se ainda uma descida ligeira nestas mesmas classes de variação de concentração após a estação seca seguinte. Para esta descida terá contribuído a redução da área poluída onde se detectaram as concentrações mais elevadas, em cerca de 6% para a classe 200-300 mg/L e 2,6% para a classe 300-400 mg/L.

Foram também quantificadas as reservas poluídas do aquífero superficial no âmbito da realização de uma das tarefas do Projecto Gabardine, seguindo a metodologia proposta em Lobo-Ferreira *et al.* (2007), que considera dois cenários possíveis no que se refere ao volume de água poluído e estima o volume de água necessário para diluir a concentração de NO_3 estimada. O cenário A corresponde à quantificação do volume de água poluído por NO_3 , com base nos valores registados na campanha de Setembro de 2006 e à estimativa do volume de água que é necessário injectar no aquífero, para o cumprimento da Directiva-Quadro da Água. O cenário B, considera os efeitos da implementação de um Programa de Acção para a Campina de Faro. Estimou-se um volume de água poluído de $75 \times 10^6 \text{ m}^3$, considerando $6,5 \text{ Km}^2$ de área, uma espessura média saturada de 38 m e uma porosidade média de 30%. Para 130 mg/L de concentração média a quantidade de NO_3 e N foi de 9692 toneladas e 2188 toneladas, respectivamente. Uma vez que a aplicação da Directiva-Quadro da Água refere um valor máximo de 50 mg/L de NO_3 nas águas subterrâneas, o volume de água estimado em $75 \times 10^6 \text{ m}^3$, como tendo uma

concentração média de NO_3 de 130 mg/L, deveria ser diluído em $120 \times 10^6 \text{ m}^3$ correspondendo ao volume de água a injectar no aquífero para o cumprimento da Directiva (cenário A). No caso do cenário B, estimou-se um valor de incremento anual devido às práticas agrícolas de 2,2 mg/L. Com este cenário seria necessário recarregar o aquífero com $122 \times 10^6 \text{ m}^3$ de água, por forma a ser compensado o incremento anual na concentração de NO_3 . Contudo, a análise deste cenário terá de incluir, também, uma componente natural de entrada de água, a partir da recarga, da infiltração do escoamento superficial no rio Seco e a partir dos afloramentos carbonatados que marcam o limite Norte do sistema (Lobo-Ferreira *et al.*, 2007).

No Capítulo 5 descrevem-se os ensaios *in situ* de recarga artificial realizados na Campina de Faro e analisam-se os resultados obtidos. O principal objectivo destes ensaios foi avaliar o desempenho de diferentes metodologias de recarga artificial do aquífero superficial, em termos de taxas de infiltração, avaliar os efeitos da sua aplicação, em termos de qualidade da água subterrânea, recorrendo a fontes de água alternativas (como o escoamento superficial), e determinar parâmetros hidráulicos do aquífero, designadamente permeabilidades e velocidades de escoamento no meio subterrâneo. Os dois locais seleccionados para a implementação dos ensaios localizaram-se no Areal Gordo e no leito do rio Seco, próximo da zona de Carreiros.

Na zona do Areal Gordo foram realizados ensaios de recarga artificial recorrendo a bacias de infiltração e à injeção de água num poço e num furo. As bacias de infiltração estavam a abertas em diferentes horizontes arenosos e permitiram determinar taxas de infiltração variáveis em função do tipo de solo. Numa das bacias realizou-se também um ensaio de traçador, que incluiu a monitorização da zona não saturada e permitiu estimar parâmetros hidráulicos. Na zona de Carreiros foram construídas duas bacias de infiltração no leito do rio que promovem a infiltração do escoamento superficial. Este sistema de recarga foi analisado em termos de eficiência de recarga e dos seus efeitos na qualidade da água subterrânea. A aplicação *in situ* de diferentes métodos de análise possibilitou um estudo mais alargado destes aspectos, nomeadamente a realização de um ensaio de traçador e a aplicação de métodos de resistividade eléctrica para acompanhamento da sua evolução espaço-temporal.

Procurou-se sintetizar a informação obtida nos ensaios de recarga artificial em bacias e em poço/furo, em termos de taxas de infiltração, com parâmetros físicos com os quais estes valores se relacionam, nomeadamente, a carga hidráulica exercida pela coluna de água durante o ensaio e o tipo de solo. Um dos objectivos deste tipo de análise consiste na possibilidade de poder extrapolar os resultados obtidos para outros locais, de acordo com o tipo de solo presente, ou prever taxas de infiltração em função do volume disponível para efectuar a recarga e a eficiência esperada para o tipo de sistema de recarga. Estes resultados podem contribuir para o desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão em termos de selecção de metodologias de recarga artificial, na medida em que representam variáveis facilmente estimadas e quantificadas em função das características intrínsecas dos solos dos locais ou em função da carga hidráulica.

O Capítulo 6 apresenta duas ferramentas básicas para o tratamento e análise de um conjunto de informação que foi apresentada anteriormente, nomeadamente a modelação matemática como ferramenta para a previsão de respostas do meio subterrâneo face a

situações de recarga planeada e a aplicação de Sistemas de Apoio à Decisão como ferramenta de análise multicritério, tendo como objectivo final a selecção das técnicas mais adequadas, em termos ambientais, minimizando os custos associados à sua implementação real.

Neste sentido foi desenvolvido um modelo de escoamento subterrâneo e do transporte de nitratos na zona central da Campina de Faro, recorrendo ao modelo de elementos finitos FEFLOW, que incorporou a informação obtida nos Capítulos 3, 4 e 5, visando obter uma perspectiva do desempenho integrado das metodologias de recarga, numa escala maior, em termos qualitativos e quantitativos das águas subterrâneas. Como exemplo foram simulados alguns cenários de recarga artificial. Contudo, é proposto um conjunto mais vasto de cenários cuja descrição se apresenta no Quadro 6.9, bem como a quantificação dos volumes e tempos de recarga no Quadro 6.10.

No que se refere à modelação matemática, algumas dificuldades surgiram, que foram ultrapassadas, das quais se destacam as seguintes: a) a modelação de dois aquíferos com uma geometria pouco regular, com uma zona de afloramento do aquífero inferior; b) a passagem do modelo conceptual hidrogeológico para o modelo tridimensional no FEFLOW necessitou de alguns ajustes, em termos geometria das camadas modeladas, de modo a evitar zonas de células secas, que em alguns casos, dificultaram a convergência do modelo; c) o facto da piezometria do aquífero semi-confinado poder estar influenciada pela mistura com o aquífero superior; d) a influência do regime de bombagem nos resultados de piezometria; e) a ausência de informação mais precisa sobre os volumes e regimes de extracção aplicados; e) a calibração inversa efectuada com o PEST que, no final, acabou por não produzir resultados satisfatórios.

Na parte final do Capítulo 6 introduz-se uma abordagem aos Sistemas de Apoio à Decisão. Formaliza-se teoricamente um problema de decisão para o caso concreto da Campina de Faro cuja estruturação se descreve no organigrama da Figura 7.1. Finaliza-se com a sugestão de aplicação de um programa com potencialidades na área da análise multicritério, denominado *Decision Lab 2000*, que visa a melhor escolha de entre um conjunto de cenários diferentes de recarga artificial, considerando também a análise critérios ambientais e económicos associados.

7.2 Prosseguimento da investigação

O tema principal desta Tese incidiu sobre o estudo da recarga artificial de aquíferos como metodologia a aplicar para melhorar a qualidade da água subterrânea no aquífero superficial da Campina de Faro. Diversos foram os aspectos abordados ao longo do desenvolvimento deste trabalho, contudo, alguns ficaram por desenvolver e poderão futuramente ser considerados no âmbito de estudos a realizar na mesma área temática. Em seguida enumera-se uma lista de sugestões para temas futuros de investigação:

- 1) Gestão da recarga artificial de aquíferos como contributo fundamental para alcançar a sustentabilidade ambiental, económica e social do uso da água, em zonas áridas e semi-áridas.

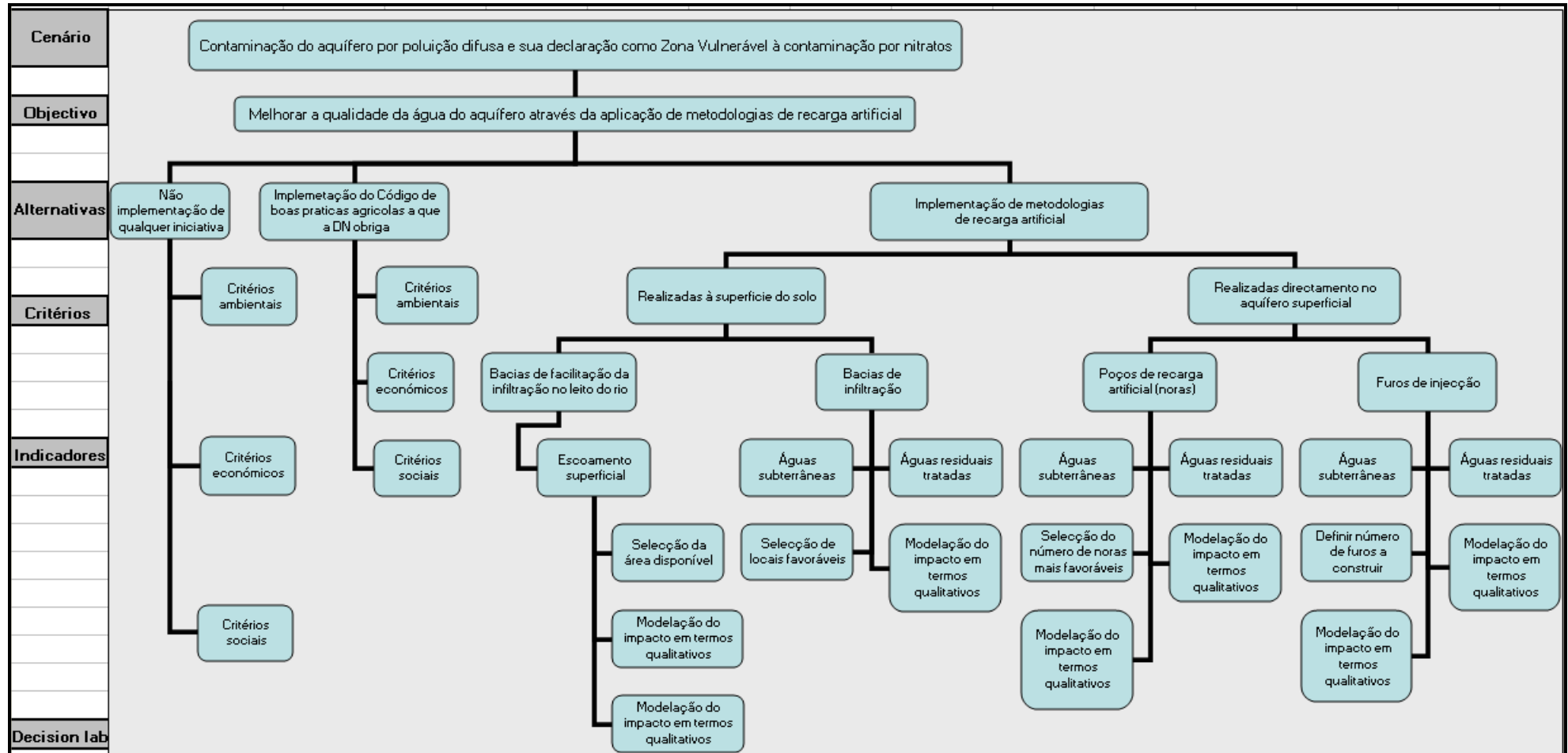


Figura 7.1 – Organigrama para a estruturação do problema de decisão a formular para o *Decision Lab* 2000

2) Desenvolvimento de estudos de aplicação prática de metodologias de recarga artificial de aquíferos e avaliação da eficiência e desempenho de diferentes metodologias, em função das características hidráulicas do aquífero, do tipo de solos e da espessura disponível para o armazenamento subterrâneo.

3) Avaliação da eficiência de sistemas de recarga artificial de aquíferos, em termos de taxas de infiltração e pesquisa dos efeitos a longo-prazo dos processos de colmatação do meio subterrâneo. Pesquisa e aplicação prática de alternativas físicas e químicas para reabilitação destes sistemas. Pesquisa e aplicação de alternativas que visem a minimização dos efeitos de colmatação.

4) Desenvolvimento de estudos de gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos que visem a implementação de metodologias de recarga artificial como forma de armazenamento subterrâneo, em períodos de maior disponibilidade, para utilização futura, em períodos de escassez. Análise dos efeitos das alterações climáticas, em termos de qualidade e quantidade da água, nestes locais.

5) Pesquisa e estudo de fontes de água alternativas destinadas à recarga artificial e avaliação de volumes disponíveis e qualidade da água.

6) Utilização de águas residuais tratadas como fonte de água alternativa para a recarga artificial de aquíferos, nomeadamente através de bacias de infiltração, possibilitando a interacção química solo/água. Estudo das reacções químicas na zona não saturada e aspectos de qualidade da água antes da recarga e após a sua passagem pelo meio subterrâneo. Estudos de risco para a saúde pública no caso de recarga artificial de aquíferos, com águas residuais tratadas, destinados ao abastecimento público. Estudos de viabilidade económica deste tipo de aplicação em zonas de grande escassez de água.

7) Estudo e análise das alterações causadas pela recarga artificial na qualidade e quantidade das águas subterrâneas.

8) Compreensão e análise dos processos hidrogeoquímicos que ocorrem sob as bacias de infiltração devido às variações das condições de saturação do meio durante a infiltração.

9) Estudo de aplicabilidade de metodologias de recarga artificial para a resolução de problemas de subsidência dos solos, em locais de sobre-exploração de águas subterrâneas.

10) Estudo da aplicabilidade de metodologias de recarga artificial em aquíferos costeiros, optimizando volumes de descarga e caudais de extracção do aquífero, visando a redução dos efeitos da intrusão salina na qualidade das águas subterrâneas.

11) Aplicabilidade da recarga artificial para o cumprimento dos objectivos ambientais da Directiva-Quadro da Água.

12) Estudo dos processos físico-químicos e microbiológicos que afectam e controlam as alterações da qualidade da água, durante o seu percurso no meio subterrâneo, desde que se infiltra até à zona de captação, no caso de sistemas de

injecção e recuperação da água infiltrada. Para este tipo de estudo a monitorização de elevada precisão e especificidade é essencial, quer dos parâmetros hidráulicos e hidrogeoquímicos, e da sua variabilidade no espaço e no tempo.

13) Modelação matemática recorrendo a modelos integradores da zona saturada e da zona não saturada, que incluíam os processos de escoamento e os processos hidrogeoquímicos que ocorrem nos locais de recarga artificial. Constituirão uma ferramenta fundamental para obter respostas que permitam a compreensão e análise destes processos.

14) Desenvolvimento de Sistemas de Apoio à Decisão incorporando as componentes ambiental e sócio-económica. Constituirão uma ferramenta essencial para a definição de recarga artificial como metodologia de gestão de aquíferos. Este tipo de ferramenta cuja aplicação preliminar se iniciou nesta Tese, necessita de ser aprofundada, considerando uma abordagem interligada entre as diversas componentes a considerar. Cada vez mais as decisões devem ser tomadas considerando uma abordagem interligada entre as diversas áreas do conhecimento. Este tipo de metodologia constitui uma ferramenta muito útil na medida em incorpora o conhecimento científico em diversas áreas, incorpora a análise de diferentes critérios e auxilia a tomada de decisões para uma gestão sustentável do recurso “água”.

15) Desenvolvimento de metodologias de optimização da recarga artificial visando aspectos qualitativos e quantitativos das águas subterrâneas e a minimização dos custos totais de implementação, manutenção e operação dos sistemas de recarga constitui igualmente uma área de prosseguimento de investigações futuras.

16) Complemento à investigação de metodologias que permitam um conhecimento geológico e hidrogeológico detalhado do aquífero da Campina de Faro. O sucesso da aplicabilidade das metodologias de recarga artificial depende desse conhecimento. Constitui uma área onde se deve concentrar a investigação inicial do estudo. Os métodos geofísicos foram utilizados nesta Tese e em Mota (2007), com resultados muito positivos. A sua utilização pode ser considerada noutros estudos de caracterização e monitorização ambiental do meio subterrâneo. Outros métodos de prospecção directa, como a execução de sondagens de reconhecimento geológico, ensaios de caudal e ensaios com traçadores devem também ser incluídos.

17) Questões complementares relacionadas com o tema “Economia da água” (custo e valor da água), constituem novas áreas de investigação, visando dar cumprimento à legislação aprovada recentemente (e.g. Decreto-Lei n.º 97/2008, de 11 de Junho, que aprova o regime económico e financeiro dos recursos hídricos).

7.3 Considerações finais

O principal objectivo desta Tese consistiu em investigar a possibilidade da recarga artificial de aquíferos poder ser aplicada com sucesso, contribuindo para a recuperação gradual da qualidade da água do aquífero afectado por poluição difusa na Campina de Faro. Esta técnica, considerada essencial na gestão de recursos hídricos, encontra-se muito difundida em diversos países, normalmente em zonas áridas e semi-áridas, mas também noutros locais, como medida fundamental ao desenvolvimento sustentável dos

recursos hídricos. Deste modo, foram aplicadas *in situ* e analisadas diversas metodologias de recarga, em termos de eficiências de recarga, volumes recarregados e aspectos de melhoria da qualidade da água após recarga. Os resultados, em termos de taxas de infiltração, foram muito favoráveis, dentro da gama de valores que normalmente se obtêm em diversos Projectos internacionais de recarga artificial, referenciados na literatura.

Paralelamente foram ainda investigadas fontes de água alternativas ou convencionais, destinadas à recarga artificial, salientando-se o escoamento superficial em períodos de cheias, com vantagens ao nível dos aspectos qualitativos da água e aspectos económicos, e a água proveniente do aquífero confinado, com aspectos em termos de qualidade da água, menos favoráveis.

A utilização de ferramentas de análise, *i.e.*, de modelação matemática e de análise multicritério mostrou-se muito útil, no sentido de poder prever respostas e definir acções e decisões futuras com fundamentos científicos.

Complementarmente, o desenvolvimento da Tese beneficiou de um conjunto de experiências de recarga artificial, desenvolvidas em paralelo com as do caso de estudo da Campina de Faro, no âmbito das actividades do Projecto GABARDINE, nomeadamente o caso de estudo da Grécia (Bacia de Thessaloniki, em Sindos), o caso de estudo de Espanha (rio Llobregat, em Barcelona) e o caso de estudo de Israel, com diversos sistemas de recarga já existentes. Todos estes casos de estudo foram visitados durante o período de desenvolvimento da Tese, assim como se acompanhou os trabalhos realizados, tendo por isso sido enriquecedor para a Tese os conhecimentos científicos transmitidos nessas áreas.

Considera-se muito importante que, nos seis anos que faltam para o término do prazo imposto pela Directiva Quadro da Água, se possa dar início a um "Projecto de Demonstração", numa escala maior, especificamente para o sistema aquífero da Campina de Faro, ou para outro local, onde a aplicação das metodologias de recarga artificial de aquíferos sejam determinantes para o cumprimento dos objectivos ambientais referidos na legislação nacional e comunitária, em termos de qualidade e/ou quantidade dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais.

Lisboa, 24 de Fevereiro de 2009
Catarina Diamantino

