



GESTÃO DE RECARGA INDUZIDA DE AQUÍFEROS. EXEMPLOS DO PROJETO MARSOL NO ALGARVE

Teresa E. Leitão¹, J.P. Lobo Ferreira¹, Tiago Carvalho², José Paulo Monteiro³, Manuel M. Oliveira¹, Rui Agostinho², Luís R.D. Costa³, Tiago Martins¹, Maria José Henriques¹

1. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, tleitao@lnec.pt, lferreira@lnec.pt, moliveira@lnec.pt, mjhenriques@lnec.pt, tmartins@lnec.pt

2. Terra, Ambiente e Recursos Hídricos (TARH), Rua Forte Monte Cintra 1B3, Sacavém, tcarvalho@tarh.pt, rdagostinho@tarh.pt, jmc@tarh.pt

3. Universidade do Algarve (UALg), Estrada da Penha, 8005-139 Faro, jpmonte@ualg.pt, luis.r.d.costa@gmail.com

Resumo

A utilização de técnicas de MAR (managed aquifer recharge, em nomenclatura inglesa ou gestão de recarga induzida de aquíferos) visa armazenar água em aquíferos durante períodos de excedentes podendo ajudar a resolver posteriores desafios de escassez de água e, assim, melhor gerir a variabilidade temporal da disponibilidade de água. Além disso, a qualidade da água pode ser melhorada através da sua circulação pelo meio poroso até ao aquífero, como resultado de processos químicos e biológicos, para além da própria diluição. Nesse contexto, a recarga induzida de aquíferos pode ser um importante contributo para resolver a crise de água da Europa, ligando o uso de excedentes hídricos com a reutilização de água e a gestão de recursos hídricos.

Neste artigo apresenta-se uma síntese dos ensaios de demonstração sobre MAR realizados nos aquíferos da Campina de Faro (PT1) e Querença-Silves (PT2), no Algarve, pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pela Terra, Ambiente e Recursos Hídricos (TARH), e pela Universidade do Algarve (UALg), parceiros do projeto MARSol "Gestão de recarga induzida de aquíferos como uma solução para a escassez de água e secas", do 7.º Programa-Quadro da União Europeia.

As fontes de água alternativas exploradas no âmbito do MARSol são excedentes hídricos superficiais gerados em eventos extremos durante as estações chuvosas e efluentes de águas residuais com tratamento secundário. Ambos estão a ser estudados no sentido de avaliar os volumes disponíveis e sua importância no contexto do balanço hídrico regional e da sua qualidade, o primeiro para a Campina de Faro e o segundo para o Querença-Silves. A melhoria da qualidade da água é o objetivo principal em ambos os aquíferos, no primeiro através da recarga por bacias, furos e noras e, no segundo caso, melhorando a qualidade das águas residuais por processos de atenuação e de filtração naturais de tratamento aquífero do solo (SAT).

Palavras-chave: MAR (gestão da recarga induzida de aquíferos); qualidade da água subterrânea; armazenamento subterrâneo; gestão de secas, Algarve.

Tema: Soluções sustentáveis e resilientes para bacias hidrográficas e cidades.

1. AQUÍFERO DA CAMPINA DE FARO E RIO SECO

1.1 Breve descrição

A área de estudo PT1 localiza-se no rio Seco e zonas adjacentes, sobre o sistema aquífero da Campina de Faro. Este aquífero tem uma área de 86,4 km² e é composto por múltiplas camadas ou unidades hidrogeológicas: uma camada livre de areia do Miocénico superior (unidade 3), uma camada semi-confinada de calcário arenoso do Miocénico inferior (unidade 2) e, na parte inferior destes, uma camada confinada do cretácico composta por calcários e mármore (unidade 1) (Stigter, 1995). Entre as unidades 2 e 3 existe uma camada confinante composta por várias camadas de areia silto-argilosa com espessura variável, embora alguns autores considerem que a mesma não existe nalguns setores, permitindo assim alguma conexão hidráulica. A construção de diversos furos dentro dos poços tradicionais que aumentaram artificialmente o grau de ligação entre as unidades 2 e 3.

Esta é uma região altamente afetada pela contaminação por nitratos (**Figura 1**), devido à agricultura intensa, motivo que levou a ser declarada como uma Zona Vulnerável aos nitratos, desde 1997. Historicamente, até 1980, apenas a unidade hidrogeológica do Miocénico superior foi explorada, através de grandes poços tradicionais feitos à mão. Após o desenvolvimento de técnicas de perfuração, as unidades inferiores passaram a ser a principal fonte de água subterrânea, usada principalmente para a irrigação.

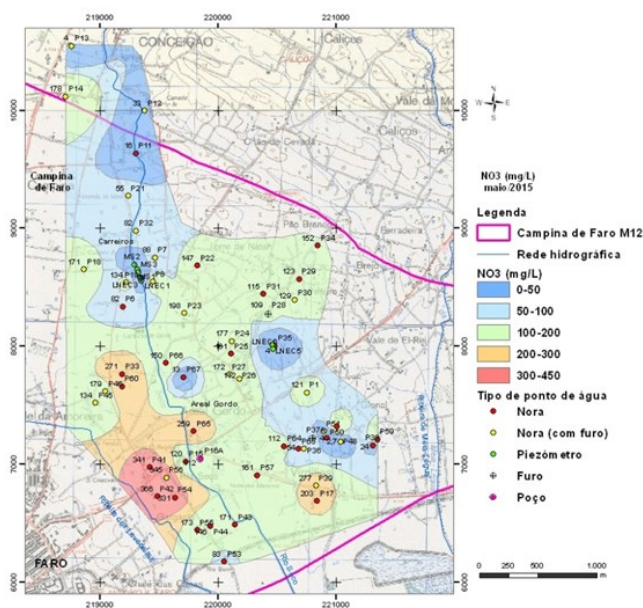


Figura 1. Concentração de nitratos no aquífero da Campina de Faro, Miocénico

1.2 Objetivo

O principal objetivo da área PT1 é demonstrar que a qualidade da água do aquífero pode ser melhorada através da utilização de técnicas de MAR. Para este efeito foram escavadas no leito do rio Seco diversas bacias de recarga, que estão a ser testadas e monitorizadas, usando tanto as bacias construídas em 2006, durante o projeto GABARDINE UE (PT1_1, Lobo-Ferreira *et al.*, 2006 e Diamantino, 2008), como as novas bacias MARSol (PT1_2) construídas em Julho/Agosto de 2014 (**Figura 2** e **Figura 3**). A infiltração em poços de grande diâmetro (PT1_3) está a ser testada como uma infraestrutura de MAR para aumentar a recarga de água à escala regional e melhorar a qualidade das águas.



Escavação do leito do rio Seco



Enchimento das bacias de MAR do rio Seco

Figura 2. Construção de uma nova bacia de infiltração e piezômetros para monitorização da área PT1_2 Campina de Faro

1.3 Ensaios realizados

A nova bacia infiltração MARSol tem uma profundidade média de 6,7 m, uma área de 201 m² (33 m x 6,1 m) e ocupa toda a secção transversal do rio, à semelhança das bacias anteriores do projeto GABARDINE (**Figura 3**). A sua área é cerca do dobro das bacias antigas. As bacias de infiltração foram preenchidas com cascalho bem calibrado e foram niveladas. Além das bacias de infiltração, foram construídos três novos piezômetros (MS1, MS2 e MS3) e reabilitado o furo LNEC 1, além dos furos LNEC 2 e 3 em funcionamento. Foram, ainda, colocadas ponteiras nas bacias. Os piezômetros têm entre 20 e 30 m de profundidade e registam dados do Miocénico superior.

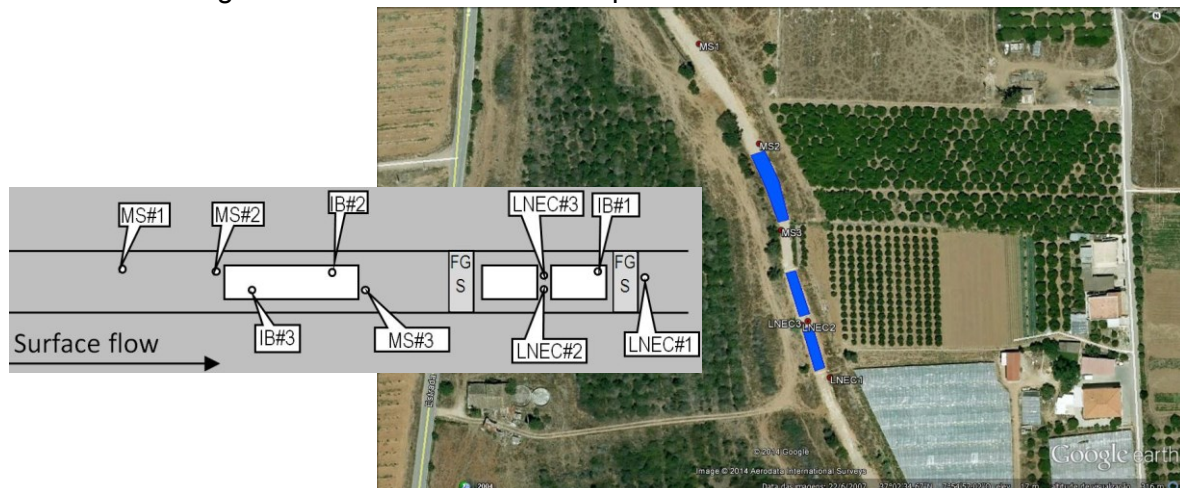


Figura 3. Esquema das bacias de infiltração e dos piezômetros para monitorização da área PT1_1 e PT2_2, Campina de Faro (Leitão *et al.*, 2015a)

Foram conduzidos diversos ensaios, brevemente referidos nesta comunicação, para determinar as taxas de infiltração nas diferentes bacias bem como a velocidade e a dispersão no aquífero. Além dos ensaios, está em curso a monitorização contínua de todo o sistema para avaliar o efeito de todos os episódios de precipitação e sua influência nas bacias de infiltração e no aquífero em termos regionais. Para esse efeito é, ainda, feita anualmente uma análise da evolução dos nitratos em toda a área envolvente aos ensaios.

Os processos estão a ser modelados numericamente.

Durante projeto MARSol os ensaios realizados foram:

- PT1_1 - Teste de avaliação da colmatação na bacia de infiltração de jusante do GABARDINE, para avaliar a eventual diminuição da infiltração devido ao *clogging* natural entre 2007 e 2014 (área total de 100 m²);
- PT1_1 e PT1_2 - Teste global de todas as bacias (MARSol, 201 m² e GABARDINE, 2 x 100 m²), para avaliar a capacidade de infiltração total do sistema MAR;
- PT1_2 - Teste da bacia do MARSol usando NaCl como traçador para estimar não só o tempo de residência, mas também a velocidade e dispersão da água infiltrada;
- PT1_3 - Teste de infiltração num poço de largo diâmetro para avaliar a capacidade de infiltração do poço.

Em todos os testes de infiltração, a água injetada foi captada a partir da unidade hidrogeológica do Miocénico inferior, que não está na conexão hidráulica com o Miocénico superior neste local, o que foi demonstrado através de medições piezométricas.

a) Teste de avaliação da colmatação na bacia GABARDINE (PT1_1) (Oliveira *et al.*, 2015)

Este teste teve como objetivo determinar a capacidade de infiltração da bacia em 2014, sete anos após a última manutenção e teste que haviam sido feitos em 2007, no final do projeto GABARDINE. Os resultados para a taxa de infiltração variaram com a altura da água na bacia de infiltração. Com a bacia cheia e o nível da água constante e 0,16 m acima da superfície (**Figura 4**), a taxa de infiltração apresentou valores entre 1,19 e 3,6 m/d. À medida que a altura de água diminuiu na bacia, a taxa de infiltração baixou para 0,64 m/d e estima-se que vá decrescendo com a diminuição da altura da água. Estes valores estão de acordo com os valores determinados durante o projeto GABARDINE. A condutividade hidráulica foi estimada como sendo 0,73 m/d, com uma adaptação da Fórmula de Thiem para o fluxo radial em aquíferos não confinados.

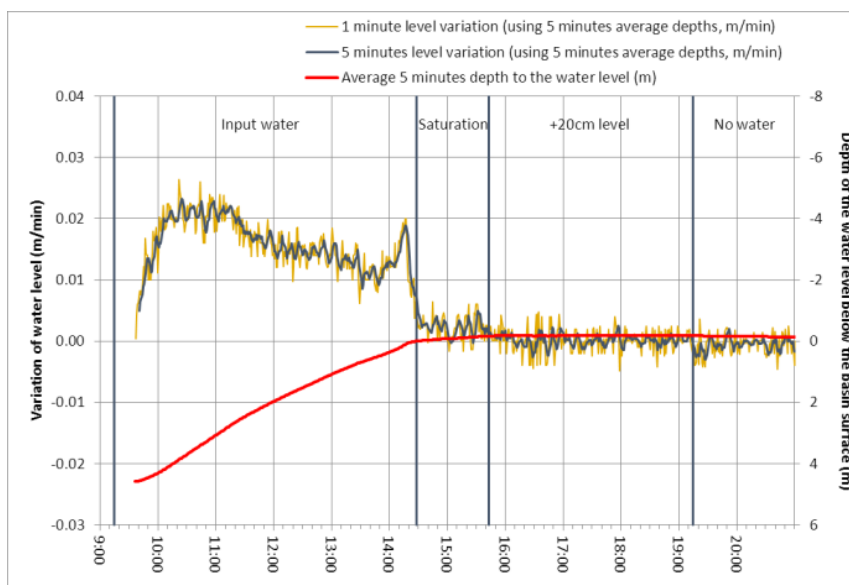


Figura 4. Média móvel de 5 minutos da profundidade ao nível piezométrico na bacia, e médias móveis de 1 e de 5 minutos das variações do nível piezométrico (Oliveira *et al.*, 2015)

No que se refere à taxa de colmatação, o aumento da variação do nível de água registado perto do período final da etapa de enchimento (**Figura 4**) pode ser uma indicação de um estrato obstruído dentro da bacia de infiltração. Este estrato situa-se entre 9 e 33 cm abaixo do solo. No entanto os dados de taxa de infiltração indicam que os resultados foram muito próximos, sugerindo que a colmatação na bacia possa ser facilmente ultrapassada com uma simples operação de remoção mecânica.

b) Teste de infiltração em todas as bacias de infiltração (PT1_1 e PT1_2) (Leitão *et al.*, 2015a)

Foi feito um teste de infiltração, semelhante ao apresentado em a), utilizando o conjunto de todas as bacias disponíveis e enchendo de água os cerca de 7 m de zona vadosa de cada bacia (**Figura 5**). Registou-se uma infiltração de 21,6 m³/h para uma carga hidráulica de 20 cm acima do solo (na bacia do MARSol). Isto corresponde a uma taxa média de infiltração de 1,3 m/dia. Nos piezómetros observou-se uma rápida elevação de 1 m no nível da água do LNEC1 (a jusante das bacias) e no MS3 (entre as Bacias GABARDINE e MARSol). Nos piezómetros a montante observou-se um aumento de cerca de 0,5 m no MS2, e um ligeiro impacte do ensaio no MS1 (localizado 45 metros a montante da bacia do MARSol).

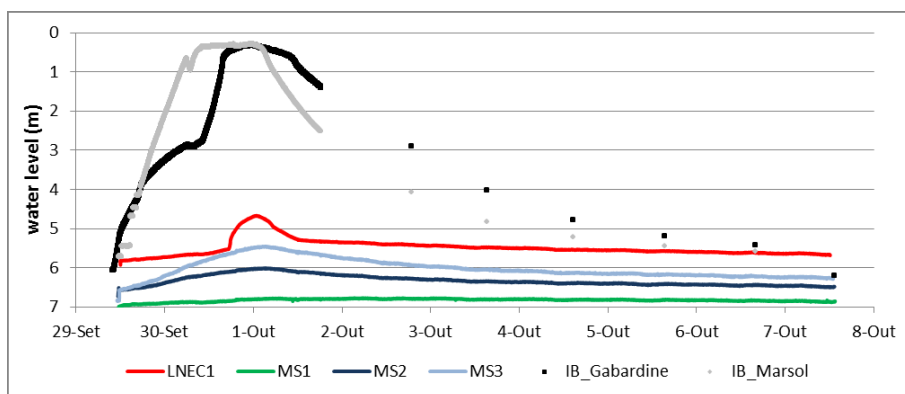


Figura 5. Níveis de água nos piezómetros e nas ponteiros das bacias (IB) (Leitão *et al.*, 2015a)

c) Teste qualitativo da bacia de infiltração MARSol (PT1_2)

Este ensaio de traçador consistiu na infiltração de 460 m³ de água com NaCl com a concentração de 2000 mg/L (valor cerca de dez vezes superior à concentração regional média). A taxa de infiltração calculada foi de 1,9 m/d (fluxo de infiltração de 15,7 m³/h) para um nível constante de água de 20 cm acima da bacia. A condutividade elétrica foi medida em todos os piezómetros. A condutividade hidráulica estimada foi de 2,4 m/d, com uma adaptação da Fórmula Thiem para o fluxo radial em aquíferos não confinados.



Figura 6. Preparação do teste qualitativo na bacia de infiltração do MARSol, no rio Seco

O conjunto de testes realizados permitiu a elaboração de um modelo conceptual das bacias de infiltração como apresentado na **Figura 7**. Os vários ensaios indicam que existem diferenças significativas no desempenho das bacias devido às suas áreas, posição e permeabilidade no local.

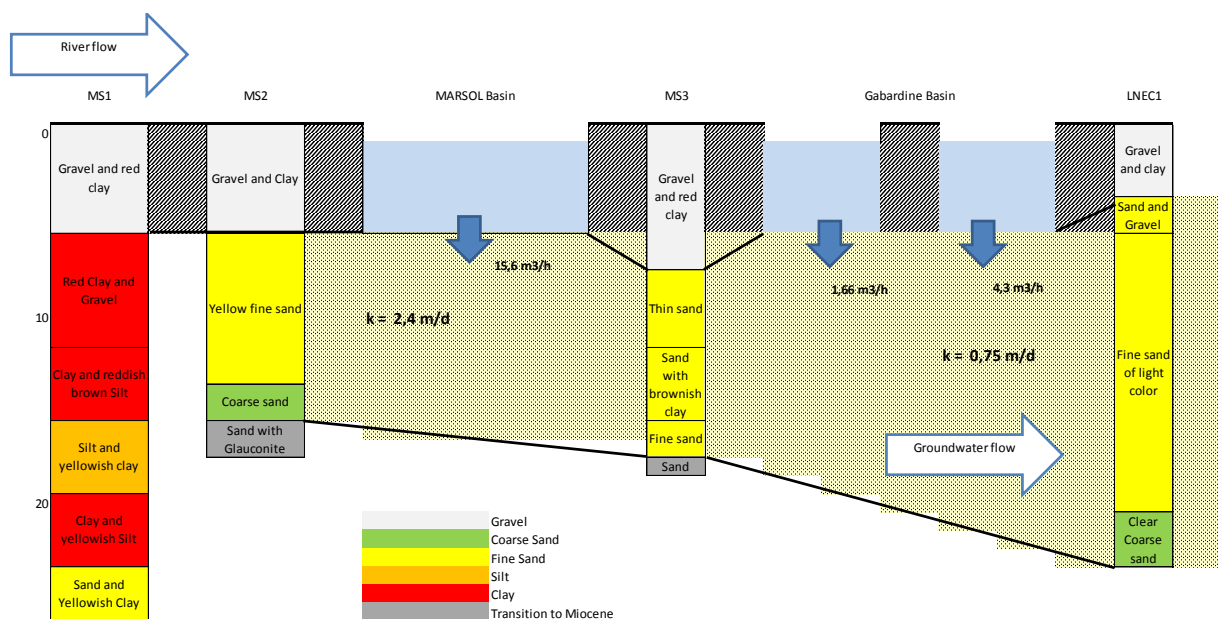


Figura 7. Modelo conceptual local das bacias de infiltração no leito do rio Seco

d) Teste de infiltração num poço de largo diâmetro para avaliação da sua capacidade de infiltração (PT1_3) (Costa *et al.*, 2015b e Leitão *et al.*, 2015a)

A água de precipitação recolhida no telhado das estufas da Campina de Faro pode ser considerada como uma fonte de água importante para MAR no local de teste. Esta fonte de água, estimada em 1,63 hm³/ano na área Campina de Faro (Costa *et al.*, 2015b), poderá ser utilizada para a infiltração nos poços de largo diâmetro existentes na área de estudo, contribuindo para melhorar a qualidade da água no aquífero da Campina de Faro. Neste contexto realizou-se um teste de injeção num poço de largo diâmetro (19 m de profundidade e um diâmetro de 4,5 m). A profundidade do nível da água no início do teste era de 10,28 m, o que resulta numa altura de coluna de água dentro do poço de 8,72 m. A água injetada foi extraída a partir da unidade hidrogeológica, localmente, confinada do Miocénico inferior.

O ensaio de infiltração foi realizado em três patamares, com uma taxa de injeção de 6,5 m³/h, seguida de 16 m³/h e, finalmente, de 35 m³/h. Os registos obtidos são apresentados na **Figura 8**, onde se pode observar que a elevação máxima do nível da água foi de 2,32 m acima do nível hidrostático. Os resultados do teste mostram uma elevada capacidade de infiltração, que varia de acordo com a carga hidráulica no poço. A taxa máxima de infiltração foi conseguida no passo 3 (35 m³/h), aquando da estabilização do nível de água, o que significa que toda a água injetada foi infiltrada pelo poço, sendo este valor equivalente a uma infiltração de 52 m/dia. Os resultados mostram que estes poços têm uma capacidade de infiltração muito significativa. Atendendo ao grande número deste tipo de poços na área em análise, crê-se que a qualidade das águas subterrâneas poderá vir a ser significativamente melhorada através da recolha e infiltração da água de precipitação interceptada pelos telhados das estufas.

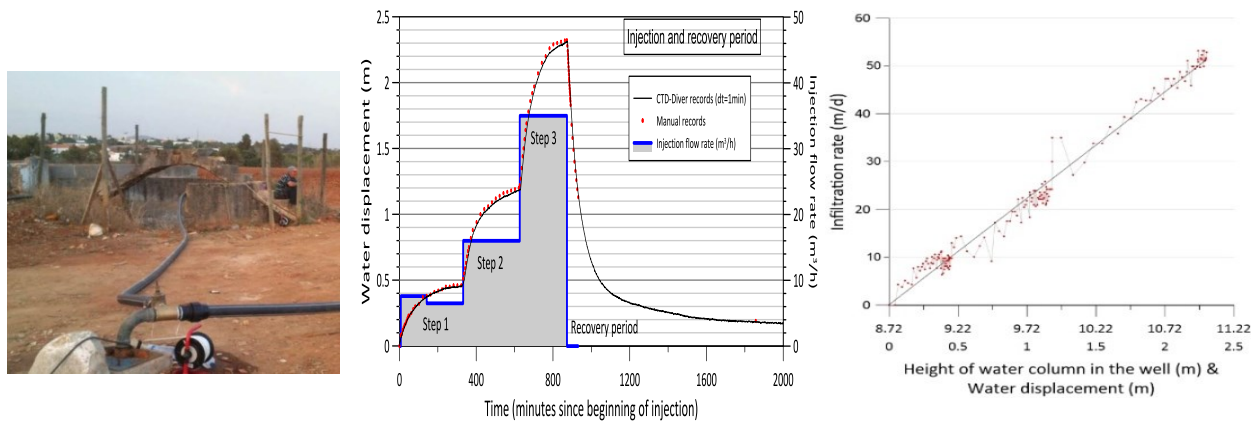


Figura 8. Teste de infiltração num poço de largo diâmetro (PT1_3). Esquerda: poço de bombeamento pode ser visto na parte inferior da imagem secundária. Meio: taxa de injeção (eixo direita) e registos CTD (eixo esquerdo) para o deslocamento da água no poço como uma função do tempo, para todos os passos de injeção e período de recuperação. Direita: taxa de infiltração em função do deslocamento da água e altura correspondente da coluna de água dentro do poço para o tempo de recuperação (Leitão *et al.*, 2015a)

2. AQUÍFERO QUERENÇA-SILVES E RIBEIRO MEIRINHO

2.1 Breve descrição

A área de estudo PT2 localiza-se sobre o sistema aquífero Querença-Silves, que constitui a maior fonte de abastecimento de águas subterrâneas do Algarve, apresentando especial resiliência nos períodos de seca. Trata-se de um aquífero cársico com extração da ordem dos $52,7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, no seu período de exploração mais intensa da água (e.g. Monteiro *et al.*, 2007).

Nesta região rural, as principais pressões sobre a qualidade da água estão relacionadas com a atividade agropecuária, a existência de fossas sépticas e a ETAR de São Bartolomeu de Messines (SB Messines).

É no contexto hidrogeológico do sistema aquífero cársico de Querença-Silves que se propõe a construção de bacias de infiltração para a promoção da recarga que ocorre naturalmente através do ribeiro Meirinho (Lobo Ferreira *et al.*, 2013) utilizando os efluentes tratados da ETAR de SB Messines, a norte, e águas do excedente potencial da ETA de Alcantarilha.

A ETAR de SB Messines está a funcionar desde 2004. Os dados existentes mostram que a água à saída ETAR é diretamente descarregada no ribeiro Meirinho, depois de um tratamento secundário, com uma vazão média entre $0,262$ e $0,418 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ (dados entre 2005-2014). Esta água tem um bom potencial para ser usada para MAR. As bacias funcionarão como meio complementar de tratamento da própria ETAR que apresenta uma carga importante de nitratos na zona de descarga no Ribeiro Meirinho, mostrando também concentrações de diversos compostos farmacêuticos na ordem das décimas de micrograma por litro, entre eles a Carbamazepina (anticonvulsivo), Diclofenac (anti-inflamatório), Naproxeno (anti-inflamatório) ou o Atenolol (β -blocker) que tendem a ser persistentes após o tratamento a que é sujeita esta água na ETAR.

2.2 Objetivos

O PT2 (sistema aquífero de Querença-Silves) tem como objetivos: (1) desenvolver um sistema Soil Aquifer Treatment (SAT) para melhorar a qualidade da água dos efluentes tratados a partir de uma ETAR (PT2_4), que descarrega água no ribeiro Meirinho (PT2_5), que tem um comportamento influente no aquífero e (2) aumentar o armazenamento de águas subterrâneas utilizando MAR para recarregar o excedente de águas superficiais durante anos chuvosos no Cerro do Bardo (PT2_6), localizado próximo a um afluente do ribeiro Meirinho. Isto contribuirá para aumentar a disponibilidade de água em anos de seca, facilitando o bombeamento de água a jusante.

2.3 Ensaios realizados para desenvolver um sistema Soil Aquifer Treatment (SAT) para melhorar a qualidade da água dos efluentes tratados de uma ETAR (PT2_4) (Leitão *et al.*, 2015b e Martins, 2016)

2.3.1 Materiais e métodos

Para o estudo dos efluentes da ETAR e da capacidade de remoção do solo em bacias SAT foram realizados diversos ensaios em coluna de solo (Martins *et al.*, 2015, Leitão *et al.*, 2015b e Martins, 2016). Foram determinadas, à escala de laboratório, as taxas de infiltração e a capacidade de remoção do solo para alguns nutrientes, metais, e compostos farmacêuticos presentes nas águas residuais tratadas. A instalação das bacias de infiltração está prevista para o primeiro trimestre de 2016, e será efetuada junto à ETAR de SB Messines com o solo otimizado para infiltração e retenção de poluentes (**Figura 9**).



Figura 9. Esquema da implementação da bacia de SAT-MAR em SB Messines

Foram recolhidas e analisadas na zona de descarga, pós-tratamento da ETAR, amostras de água correspondentes à água de infiltração que será tratada nas bacias através de técnicas SAT. Determinaram-se as concentrações de um conjunto de compostos farmacêuticos desde anti-inflamatórios a contrastes de exames radiológicos (**Quadro 1**). Foram também analisados três elementos traço comuns na matriz destas águas residuais – boro, cobre e zinco (atendendo às conclusões sobre a qualidade das águas da região apresentada em

13.º Congresso da Água

Leitão *et al.*, 2014) – e ainda outros parâmetros como nitratos, nitritos, amônia, sulfatos, sulfitos e fosfatos, para além de parâmetros medidos *in-situ* (pH, condutividade elétrica, temperatura e potencial redox). Os solos para ensaio foram recolhidos na zona de instalação das bacias na área anexa à ETAR tendo sido excluída a camada orgânica superficial.

Quadro 1. Concentração em boro, cobre, zinco e fármacos no efluente da ETAR de SB Messines (Leitão *et al.*, 2015a)

| Parameter | Unit | LNEC (AmbiPar Control) | IWW analysis | | Info |
|--|------|------------------------|--------------|--------------|---|
| | | Effluent out | Effluent in | Effluent out | |
| Date | | 23-05-2014 | 26-09-2014 | 26-09-2014 | |
| Boron | µg/l | 59 | - | - | |
| Copper | µg/l | 7,2 | <0,010 | <0,010 | |
| Zinc | µg/l | 55 | - | - | |
| Pharmaceuticals* | | | | | |
| 4-tert-Octylphenol | µg/l | - | - | 0,04 | Endocrine disruptor |
| Acesulfam | µg/l | - | 44 | 18,3 | Artificial sweetener |
| Amidotrizoat | µg/l | - | - | 0,52 | Contrast medium |
| Atenolol | µg/l | - | 0,17 | 0,09 | β-blocker |
| Beta-Sitosterol | µg/l | - | - | 10,6 | Steroid |
| Bisoprolol | µg/l | - | 0,3 | 0,04 | β-blocker |
| Bisphenol A | µg/l | - | - | 0,09 | Endocrine disruptor |
| Carbamazepin | µg/l | 0,33 | 0,19 | 0,51 | Anticonvulsant |
| Coffein | µg/l | 0,14 | - | 0,1 | Stimulant |
| DEET | µg/l | - | - | 0,08 | Repellent |
| Diclofenac | µg/l | - | 2,9 | 0,24 | Anti-inflammatory |
| EDTA | µg/l | - | - | 6,6 | Ligand/chelant |
| Gemfibrozil | µg/l | - | - | <0,02 | For cholesterol |
| Hydrochlorothiazide | µg/l | - | 0,11 | - | Diuretic |
| Irbesartan | µg/l | - | - | - | For hypertension |
| Ibuprofen | µg/l | - | - | <0,01 | Anti-inflammatory |
| lomeprol acid | µg/l | - | 0,3 | 0,07 | Contrast medium |
| Iopromid | µg/l | - | 0,16 | 7 | Contrast medium |
| Ioxithalamin acid | µg/l | - | - | 0,06 | Contrast medium |
| Levetiracetam | µg/l | - | - | - | Anticonvulsant |
| Metoprolol | µg/l | <0,06 | 0,19 | 0,04 | β-blocker |
| Naproxen | µg/l | - | 6,2 | 0,4 | Anti-inflammatory |
| Primidone | µg/l | - | - | - | Anticonvulsant |
| Propanolol | µg/l | <0,01 | 0,018 | 0,03 | β-blocker |
| Sotalol | µg/l | - | - | 0,07 | β-blocker |
| Sulfamethoxazol | µg/l | - | 0,047 | 0,02 | Antibiotic |
| Trimethoprim | µg/l | <0,02 | - | 0,01 | Antibiotic |
| Tris(1,3-dichlor-2-propyl)phosphat | µg/l | - | - | 0,5 | Flame retardant / Pesticide / Plasticizer |
| Tris(1-chlor-2-propyl)phosphat | µg/l | - | - | 1,5 | Flame retardant / Pesticide / Plasticizer |
| Tris(2-chloroethyl)phosphat | µg/l | - | 3,1 | 0,52 | Flame retardant / Plasticizer |
| *Only those with concentrations above the detection limit in effluent out or column experiments | | | | | |
| - Not analysed | | | | | |

Foram realizados diversos ensaios em coluna para o solo natural e diferentes misturas de solo (diferentes percentagens de solo natural, matéria orgânica e areia) (Martins *et al.*, 2015 e Martins, 2016) em que foram analisados parâmetros qualitativos à saída e entrada da coluna. O aparato laboratorial (**Figura 10**) segue os protocolos propostos em DEMEAU (2014) sendo composto por uma coluna cilíndrica transparente de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) de 50 cm de altura por 5 cm de diâmetro acoplada a uma plataforma de fixação com sistema de compactação acoplado.

A coluna foi previamente saturada pela base com água destilada após o preenchimento com 30 cm do solo (com exceção da coluna 1 que apresenta um ensaio com 20 cm de solo conforme Martins *et al.*, 2015), prevenindo a existência de canais preferenciais de circulação

de água. A injeção de água é feita pelo topo de forma contínua com recurso a uma bomba peristáltica ajustável e ou por pulsos adicionando-se um volume conhecido separado em intervalos pré-definidos simulando-se as condições de saturação/não saturação das bacias de infiltração. Foi, ainda, realizado um ensaio *batch* ao solo original conforme os critérios estabelecidos por EPA (1992) com a adição de água da ETAR ao solo num recipiente fechado numa proporção de 5:1.

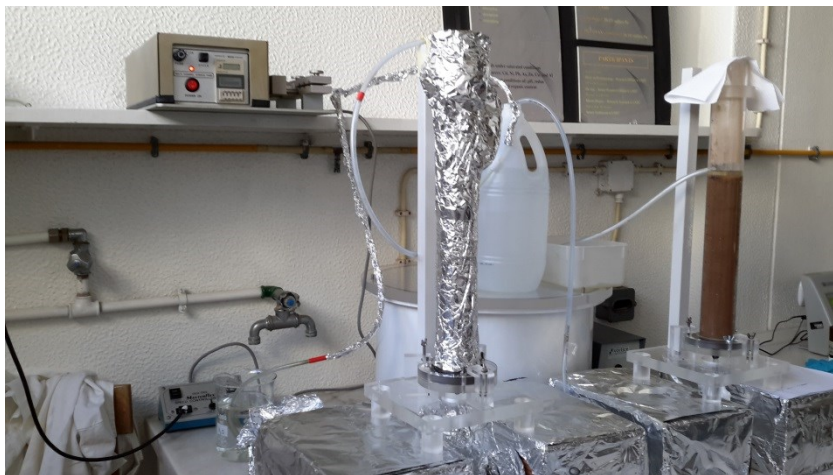


Figura 10. Ensaio laboratoriais em coluna de solo

2.3.2 Resultados obtidos

Do conjunto de 32 parâmetros analisados na água da ETAR dos quais 24 fármacos (cf. **Quadro 1** para algumas características dos efluentes em “concentração à entrada”), o ensaio *batch* permitiu observar a retenção/transformação de oito fármacos - valores abaixo do limite de deteção após interação com o solo – e a ocorrência de seis fármacos recalcitrantes mas com concentrações inferiores às da água de entrada após interação com o solo (Propranolol, Bezafibrato, Diclofenac, Gemfibrozil, Naproxeno e Carbamazepina).

Em termos dos resultados dos ensaios em coluna de solo foram feitos diversos ensaios com solo natural e diferentes misturas de solo e foram estudados ciclos de saturação e não-saturação, este último permitindo a oxigenação da coluna do solo.

Observa-se a redução da maioria dos metais pesados e fármacos presentes na água da ETAR de SB Messines. A mistura de solo (solo 40% natural, 40% de areia artificial e 20% orgânico no solo) foi a que apresentou melhor comportamento a longo prazo, em termos de capacidade de infiltração e de retenção de contaminantes. As suas propriedades permitem o tratamento cerca de 36% do volume médio diário da ETAR, não considerando efeitos de colmatção a longo prazo.

O boro tende a ser persistente após a passagem pelo solo. A amónia ocorre em concentrações menores à saída que à entrada verificando-se no entanto um aumento da concentração em nitratos. Verifica-se ainda uma pequena diminuição em sulfatos, e uma redução considerável dos fosfatos na comparação entre *inflow* e *outflow*. Cálcio e cloretos são frequentes à saída da coluna em concentrações relativamente elevadas resultado da composição do próprio solo e de processos de lavagem.

As principais lições que podem ser retiradas são (Martins, 2016): (1) a presença de uma mistura do solo com uma camada matéria orgânica (OM) favorece a retenção / degradação (principalmente através de processos de adsorção e de biotransformação) da maior parte dos fármacos estudados, bem como metais pesados (retida tanto na fração de argila e OM); (2) a sequência de condições óxicas / anóxicas é a melhor abordagem para assegurar a máxima eficiência de atenuação, já que alguns elementos se degradam melhor em condições óxicas (por exemplo, para a oxidação biológica de amónia em nitrito, nitrato e gás azoto), e os outros são degradados sob condições anaeróbicas (exemplo para vários produtos farmacêuticos); e (3) a existência de um pH elevado favorece a retenção de metais pesados ligados aos solos.

2.4 Ensaios realizados para analisar o potencial de recarregar o excedente de águas superficiais no Cerro do Bardo (PT2_6) (Leitão *et al.*, 2015a e Costa *et al.*, 2015a)

2.4.1 Materiais e métodos

Foram realizados ensaios de injeção e de traçador para determinar a capacidade de infiltração de um poço de largo diâmetro associado a uma área influente e um açude. Estes ensaios foram acompanhados de geofísica que permitiu determinar a direção principal fluxo de águas subterrâneas (cf. Costa *et al.*, 2015a).

O objetivo do MAR no Cerro Bardo consiste em contribuir para uma gestão integrada da água regional, por infiltração de parte do excedente hídrico gerado durante a estação chuvosa nas barragens do Funcho, Arade e Odelouca. Idealmente, parte desta água pode ser armazenada no aquífero e contribuir para o aumento dos níveis de água subterrânea num aquífero altamente explorado para fins de irrigação. Assim, as atividades de MAR no Cerro do Bardo atuarão como uma medida de mitigação preventiva dos efeitos das alterações climáticas e da intrusão de água salgada perto do rio Arade.

Durante projeto MARSol, os trabalhos pretendem avaliar:

- a capacidade de infiltração do sistema de poço-sumidouro-açude;
- a direção do fluxo e tempo de residência da água infiltrada;
- o dimensionamento e estimar os custos para construir as estruturas necessárias para o transporte de água do sistema de reservatório de água de superfície para o local.

Foram realizados dois testes de infiltração no Cerro do Bardo, com água fornecida por camiões de bombeiros.

2.4.2 Resultados obtidos

O primeiro teste, cujo objetivo foi estimar a capacidade de infiltração no poço, foi realizado com 40 m³ de água. A água foi injetada no poço com um caudal de 125,20 m³/h (durante 19 minutos), o que resultou num aumento de água no interior do poço de 6,38 m durante o período de injeção (**Figura 11**).

As taxas de infiltração estimadas durante o período de recuperação estão apresentadas na **Figura 12**, atingindo um máximo de cerca de 200 m/d. Como pode ser visto na **Figura 12**, direita, podem ser diferenciadas duas zonas de infiltração, cuja interface se localiza aos 6 m a partir da base do poço e que foram identificadas pelo ajuste linear A e B. Este facto sugere que, para uma altura de coluna de água inferior a 6 metros no poço, a infiltração ocorre

apenas através da parte inferior do poço e acima deste ponto, como as taxas de infiltração aumentam claramente, deverá ocorrer infiltração lateral através da parede do poço e das fissuras. Estes resultados, também encontrados no segundo teste de infiltração, contribuíram para o desenvolvimento do modelo hidrogeológico conceptual do local.

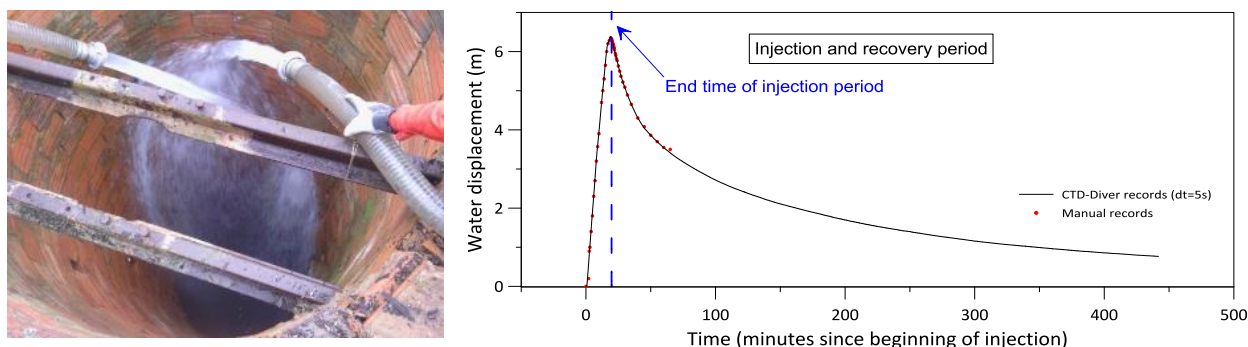


Figura 11. ESQUERDA: imagem do teste de infiltração; DIREITA: registo da variação do nível de água, manual e com sonda automática

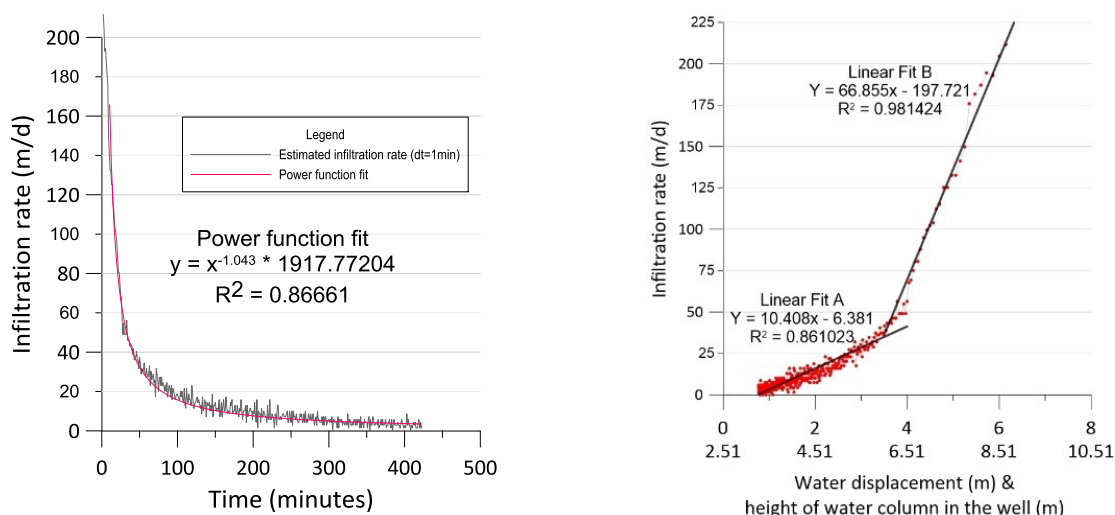


Figura 12. ESQUERDA: taxa de infiltração em função do período de recuperação; DIREITA: taxa de infiltração, em função da variação do nível de água e da correspondente altura da coluna de água dentro do poço (Costa *et al.*, 2015a)

O segundo teste de infiltração consistiu em injetar 120 m^3 de água, também fornecida por camiões de bombeiros, com 240 kg de NaCl como traçador (para uma concentração de dez vezes superior ao valor médio da região), com o objetivo de identificar a direção do fluxo da água injetada, com o auxílio dos perfis de resistividade (ERT).

Para o efeito foram realizados três perfis de resistividade, de 320 metros de comprimento cada, com o método dipolo-dipolo, nos períodos: antes, durante e até 4 dias após a injeção da água no poço. O objetivo era obter mais informações acerca da direção de escoamento da água injetada no poço com a evolução temporal da resistividade. Devido à baixa variação de resistividade com o tempo, os dados irão ser complementados noutros ensaios em 2016 para fornecer elementos mais precisos para a modelação do fluxo da água injetada.

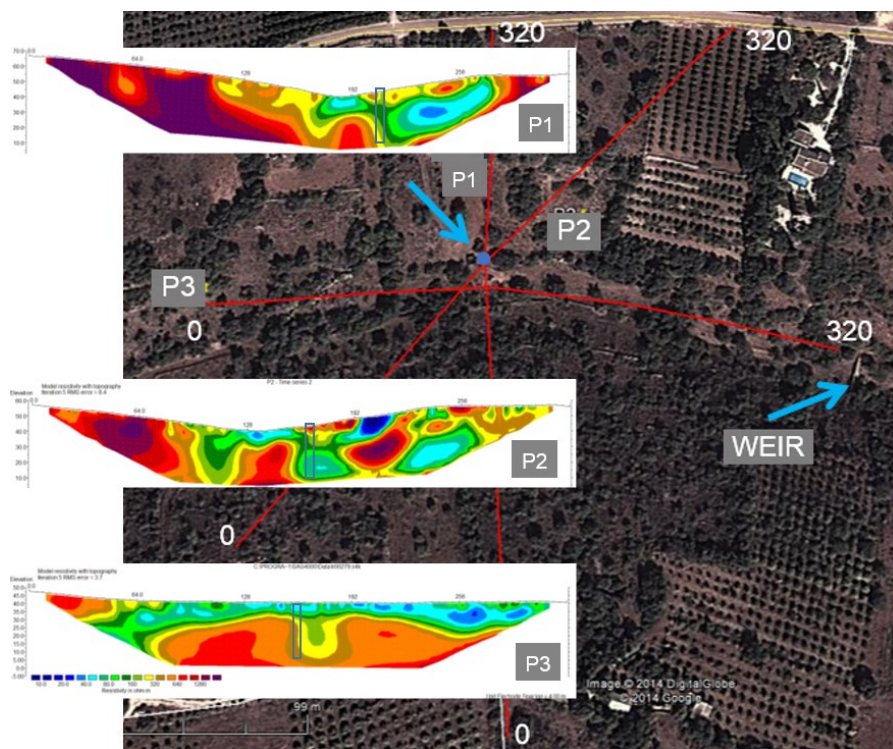


Figura 13. Localização dos perfis de resistividade realizados para o projeto MARSol (Lobo-Ferreira *et al.*, 2015)

Os resultados obtidos até ao momento sugerem que o modelo hidrogeológico conceptual no local do Cerro do Bardo é constituído por dois subsistemas verticais separados na cota 13-14 m (i.e. a 6 m do fundo do poço). O sistema mais superficial permite alguma infiltração lateral, e tem a direção principal do escoamento para Leste. Abaixo da cota de 13-14 m, a água infiltra-se principalmente através do fundo do poço e entra diretamente no aquífero regional, cuja direção principal do escoamento será para oeste, através de condutas cársicas, até às fontes de Estômbar. O subsistema superficial está provavelmente ligado ao aquífero regional através de sumidouros, como os que podem ser encontrados entre o poço do Cerro do Bardo e o açude, contribuindo para a recarga mais profunda do aquífero regional.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresenta uma breve síntese do projeto de MARSol, dos seus principais objetivos e do trabalho que está a ser desenvolvido em Portugal. A sua dimensão e interesse não permitem apresentar aqui aprofundadamente nenhum dos casos, mas sim destacar os aspetos mais relevantes e os principais objetivos do trabalho em curso, remetendo o leitor para outros artigos publicados no âmbito deste projeto.

Em PT1, sistema aquífero da Campina de Faro e rio Seco (Algarve), foram instaladas diversas bacias de recarga induzida de aquíferos no leito do rio Seco, onde foram realizados diversos ensaios de injeção e de traçador que permitiram determinar as taxas de infiltração nas bacias de recarga, bem como as propriedades de permeabilidade e dispersão no

13.º Congresso da Água

aquífero. Nesse local de demonstração está a ser efetuada continuamente a monitorização de todo o sistema para avaliar o efeito de todos os episódios de precipitação e da sua influência nas bacias de recarga, bem como o efeito regional ao nível do aquífero.

Em PT2, sistema aquífero cársico de Querença-Silves (Algarve), foram realizados ensaios de infiltração e de traçador para determinar a capacidade de infiltração de um poço de largo diâmetro e área adjacente até um açude, bem como a direção principal do escoamento de águas subterrâneas. Um ensaio de larga escala terá lugar no início de 2016. Além disso, para a área mais a norte do sistema, foram realizados vários ensaios em coluna de solo para determinar, à escala de laboratório, a melhor composição de solo para a base das bacias de tratamento de solo (SAT), em termos de taxas de infiltração e de capacidade de remoção do solo para alguns nutrientes, metais tóxicos, metalóides e fármacos existentes nas águas residuais da ETAR onde vão ser construídas as bacias SAT.

AGRADECIMENTOS

O trabalho apresentado foi desenvolvido no âmbito do projeto n.º 619120 MARSol (Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought), do 7.º Programa-Quadro da União Europeia. Agradece-se também à Agência Portuguesa do Ambiente (APA-ARH Algarve) e às Águas do Algarve (AdA) por todo o seu apoio durante este projeto. Agradece-se ao IWW (<http://iww-online.de/en/>) a realização das análises dos fármacos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Costa L.R.D., Monteiro J.P., Oliveira M.M., Lobo Ferreira J.P., Leitão T.E., Carvalho T.M., Martins de Carvalho J., Agostinho R. (2015a). Interpretation of an injection test in a large diameter well in south Portugal and contribution to the understanding of the local hydrogeology. 10.º Seminário de Águas Subterrâneas, Évora, 4 pp.

Costa L., Monteiro J.P., Leitão T., Lobo Ferreira J.P., Oliveira M.M., Martins de Carvalho J., Carvalho T., Agostinho R. (2015b). Estimating harvested rainwater at greenhouses in south Portugal aquifer Campina de Faro for potential infiltration in Managed Aquifer Recharge. Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-10415-3, 2015. EGU General Assembly 2015, 12 to 17 April, Wien. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2015/EGU2015-10415-3.pdf>.

DEMEAU (2014). Guidelining protocol for soil-column experiments assessing fate and transport of trace organics. Deliverable 12.3. 54 pp.

Diamantino C. (2008). "Recarga Artificial de Aquíferos: Aplicação ao Sistema Aquífero da Campina de Faro", Dissertação de Doutoramento submetida à Universidade de Lisboa para obtenção do grau de Doutor em Geologia (Hidrogeologia), Julho de 2008, 291 pp.

EPA (1992). Batch-type procedures for estimating soil adsorption of chemicals. 530-SW-87-006-F, United States Environmental Protection Agency, 116 pp.

Leitão T. E., Mota R., Novo M.E. e Lobo Ferreira J.P. (2014). Combined use of electrical resistivity tomography and hydrochemical data to assess anthropogenic impacts on water quality of a karstic region: a case study from Querença-Silves, south Portugal. Environmental Processes. An International Journal, ISSN 2198-7491, Volume 1, Number 1. (2014) 1: 43–57, DOI 10.1007/s40710-014-0002-1.

13.º Congresso da Água

Leitão T.E., Lobo Ferreira J.P., Oliveira M.M., Martins T., Henriques M.J., Carvalho T.M., Martins de Carvalho J., Agostinho R., Monteiro J.P., Costa L.R.D. (2015a). Deliverable 4.2 South Portugal MARSol demonstration sites characterisation. EU MARSol Project - Demonstrating managed aquifer recharge as a solution to water scarcity and drought, 78 pp.

Leitão T.E., Martins T., Henriques M.J. e Ilie A.M.C. (2015b). Ensaaios em coluna-de-solo para avaliar o destino de poluentes de ETAR simulando condições de recarga controlada de aquíferos (SAT-MAR). 12.º SILUSBA, Brasília, 22-27 de novembro de 2015.

Lobo Ferreira L.F., Diamantino, C., Moinante, M.J., Oliveira M., Leitão, T., Henriques, M.J., Medeiros, A., Dimitriadis, K., Styllas, M., Soupilas, T., Maheras, P., Anagnostopoulou, C., Tolika, K., Vafiadis, M., Machairas, C., Sanchez-Vila, X., Barbieri, M., Bensabat, J., Hadad, A., Rabi, A., Tamimi, A. (2006). Test Sites and their characteristics. Deliverable D51 of GABARDINE Project.

Lobo Ferreira J.P., Oliveira M.M., Martins T., Leitão T.E., Ilie A.M., Monteiro J.P., Costa L.R.D., Escalante E., Scarinci A., Ferri M., Rossetto R., Borsi I., Katz Y., Foglia L., Pouliaris C., Kallioras A. (2015). Deliverable 12.3 Progress Report on Numerical Model. Projeto UE MARSol - Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought, setembro, 95 pp.

Martins T. (2016). Contaminants retention in soils as a complementary water treatment method. Application in Soil-Aquifer Treatment processes. Dissertação de mestrado em Geologia Aplicada. Especialização em Hidrogeologia. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 158 pp.

Martins T., Leitão T.E., Barbosa A.E., Henriques M.J. (2015). Assessment of soil characteristics for Managed Aquifer Recharge using soil-column experiments. 10.º Seminário de Águas Subterrâneas, Évora, 4 pp.

Monteiro J.P., Ribeiro L. e Martins J. (2007). Modelação matemática do sistema aquífero Querença-Silves. Validação e análise de cenários. Relatório Técnico. Instituto da Água. 52 pp.

Oliveira M.M., Lobo Ferreira J.P., Leitão T.E., Costa L.R.D., Monteiro J.P., Carvalho T.M., Agostinho R. (2015). New test of the GABARDINE infiltration basin for MAR in rio Seco (Campina da Faro aquifer system, Algarve). 10.º Seminário de Águas Subterrâneas, Évora, 4 pp.

Stigter T. (1995). Integrated analysis of hydrogeochemistry and assessment of groundwater contamination induced by agricultural practices. Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.